

Sampo Torttila

Adaptoituva vaahdotusprosessin simulaattori

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 2.12.2013.

Työn valvoja:

Dos. Kai Zenger

Työn ohjaaja:

DI Janne Pietilä

Tekijä: Sampo Torttila		
Työn nimi: Adaptoituva vaahdotusprosessin simulaattori		
Päivämäärä: 2.12.2013	Kieli: Suomi	Sivumäärä:7+70
Automaatio- ja systeemitekniikan laitos		
Professori: Systeemitekniikka		Koodi: AS-74
Valvoja: Dos. Kai Zenger		
Ohjaaja: DI Janne Pietilä		
<p>Työssä käsitellään vaahdotusprosessin adaptoituvaa simulaattoria, jota ajetaan todellisen prosessin rinnalla. Simulaattori saa ajantasaisia tietoja rikastamon prosessitietokannasta, joiden avulla tiettyjä simulaattorin parametrejä muokkaamalla simulaattorin vaste voidaan ajaa hyvin lähelle oikean prosessin vastetta. Ideana on kalibroida simulaattoria jatkuvasti oikeaan toimintaympäristöön adaptoinnin avulla käyttäen ohjausparametrien viritykseen PID-säädintä. Työssä tutkitaan myös näin rakennetun suureen tarkkuuteen pyrkivän simulaattorin toimivuutta yleensä sekä soveltuvuutta oikean prosessin vasteen ennustamiseen lähitulevaisuudessa. Ennusteita voidaan käyttää apuna esimerkiksi ohjaushenkilökunnan ohjausvalintojen tukena.</p>		
Avainsanat: simulaattori, adaptointi, dynaaminen simulaatio, online, vaahdotusprosessi, ennuste		

Author: Sampo Torttila		
Title: An Adaptive Simulator for a Mineral Flotation Process		
Date: 2.12.2013	Language: Finnish	Number of pages:7+70
Department of Automation and Systems Technology		
Professorship: Control Engineering		Code: AS-74
Supervisor: Docent Kai Zenger		
Advisor: M.Sc. (Tech.) Janne Pietilä		
<p>This thesis work focuses on building an adaptive simulator for a mineral flotation process. The online simulator receives information from the flotation plant database and continuously adapts the chosen control parameters using PID controller algorithm. This method should increase the accuracy of the simulator. This very accurate simulator can then be used to calculate a prognosis for the state of the real flotation process in near future. These prognosis results could for example help inexperienced process operators to better control the process. This work also studies the capabilities of the described simulation system.</p>		
Keywords: Simulator, Adaptive, Dynamic, Online, Mineral Flotation, Prognosis		

Esipuhe

Kiitän ohjaajiani Janne Pietilää ja Jani Kaartista sekä valvojaani Kai Zengeriä. Haluan kiittää myös Antti Remestä Outoteciltä sekä koko Pyhäsalmen väkeä.

Otaniemi, 21.11.2013

Sampo Torttila

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vi
1 Johdanto	1
2 Aikaisempi tutkimus	3
2.1 Prosessin rinnalla ajettava adaptoituva simulaattori	5
2.2 Prosessin rinnalla ajettava simulaattori terästehtaan uunin ohjauksessa	6
2.3 Prosessia seuraava simulaattori polttokennon ohjauksessa	8
3 Vaahdotusprosessi ja sen mallintaminen	12
3.1 HSC Chemistry	16
4 Adaptoituvan simulaatio-ohjelmiston rakenne	20
5 Tulokset	29
5.1 Simulaatio ilman adaptointia (koe 1)	29
5.2 Adaptoituva simulaattori (koe 2)	33
5.3 Adaptoinnin kytkeminen pois käytöstä (koe 3)	36
5.4 Jatkuvat ennusteet (koe 4)	40
5.5 Jatkuvat ennusteet lyhyellä aika-askeleella (koe 5)	44
5.6 Ohjauksen asetusarvot (koe 6)	47
5.7 Kokonaissyötön vaihtelut (koe 7)	48
6 Yhteenveto	55
Viitteet	58
Liite A	60
A Vaahdotuskerrointen askelvastekokeiden tuloksia	60
Liite B	68
B Häiriölliset ennustekuvaajat	68
Liite C	70
C Asetusarvomuutosten analysoinnissa käytetyt kuvaajat	70

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

Δg^0	Gibbsin vapaaenergia
Δt	Aika-askeleen pituus
η_{act}	Aktivoinnin ylijännite
η_{ohm}	Ohminen ylijännite
η_{con}	Elektrolyytin konsentraatiosta riippuva ylijännite
ξ	Entrainment-parametri
σ^{mem}	Elektrolyytin ionijohtavuus
τ_f	Viipymäaika vaahdossa
τ^{mem}	Elektrolyytin paksuus
τ_{step}	Aika-askel
Cu	Kupari (alkuaine)
$CuFeS_2$	Kalkopyriitti
e	Säätösilmukan erosuure
E	Entrainment-kerroin
e^-	Elektroni
E_{oc}	Avoimen piirin jännite
F	Faradayn vakio
Fe	Rauta (alkuaine)
FeS_2	Pyriitti
H^+	Vety-ioni
H_2	Vetymolekyyli
H_2O	Vesimolekyyli
h_f	Vaahtopatjan paksuus
h_{k0}	Vaahtopatjan paksuuden yläraja
k	Diskretoitu ajanhetki
k_c	Vaahdottuvuuskerroin
K_i	PID-säätimen integraalitermin kerroin
K_p	PID-säätimen vahvistusterman kerroin
$NaCN$	Syanidi
$NaIBX$	Isobutyryliksantaatti
O_2	Happimolekyyli
p	Paine
P	Partikkelin vaahdottuvuus
Pb	Lyijy (alkuaine)
R	Kaasuvakio
R	Vaahdotuskennon mineraalisaanti
R_E	Entrainment-saanti
R_f	Mineraalisaanti vaahdosta
R_T	True-flotation saanti

R_w	Veden saanti
S	Rikki (alkuaine)
S_b	Kuplien pinta-alavuo
t	Aika
T	Lämpötila
u	Ohjaus
v	Jännite
X	Raekoko
y	Säätösystemin vaste
Zn	Sinkki (alkuaine)
$ZnSO_4$	Sinkkisulfaatti

Lyhenteet

ACT	Advanced Control Tools
CuJ	Kuparipiirin jäte
CuR	Kuparipiirin rikaste
CUEV	Kuparipiirin esivaahdotus
CUKV	Kuparipiirin kertausvaahdotus
CUPV	Kuparipiirin paskevaahdotus
CURV	Kuparipiirin ripevaahdotus
CUVV	Kuparipiirin väливаahdotus
DCOM	Distributed Component Object Model
FTP	File Transfer Protocol
HMI	Human Machine Interface
MLS	Minimum Least Squares (algorithm)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NMLS	Normalized Minimum Least Squares (algorithm)
ODBC	Open Database Connectivity
PEM	katso PEMFC
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PID	Proportional-Integral-Derivative (controller)
PLC	Programmable Logic Controller
RMLS	Recursive Minimum Least Squares (algorithm)
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SQL	Structured Query Language
VPN	Virtual Private Network

1 Johdanto



Kuva 1: Kalkopyriittiä eli kuparikiisua ja sfaleriittiä eli sinkkivälkettä sisältävä kivenäyte. Lähde: Wikimedia Commons

Kaivosteollisuus on tärkeä teollisuudenala, joka on viime aikoina ollut näkyvästi esillä mediassa. Se on ollut myös kovan arvostelun kohteena, ja on selvää, että kestävä kehitys vaatii kaivosteollisuudelta toimia ja tarkkuutta ympäristönsuojelun suhteen. TEKES on käynnistänyt vuonna 2011 tutkimusohjelman nimeltä Green Mining, jonka tavoitteena on kehittää suomalaista kaivostoimintaa ja siihen liittyvää tutkimusta [1]. Ohjelman tavoitteista voidaan nostaa esiin kaksi pääteemaa: huomaamaton ja älykäs kaivos sekä uudet mineraalivarannot. Tämä diplomityö on tehty Green Mining -ohjelmaan kuuluvaan tutkimusprojektiin Service oriented automation for efficient rock and ore exploitation (SOREX) [2]. SOREX-projektin tavoitteisiin kuuluvat mm. mineraalianalyysin, malmin murskauksen ja etsinnän sekä rikastuksen tehostamisen ja optimoinnin tutkiminen.

SOREX-projektissa on Aalto-yliopiston lisäksi mukana lukuisia yhteistyötahoja ja yliopistoja, joista tämän diplomityön tekemisessä ovat suoraan olleet osallisina mineraalin- ja metallinjalostusteknologian saralla tunnettu Outotec sekä Pyhäsalmen kaivos (Pyhäsalmi mine Oy). Pyhäsalmen kaivos on tehnyt projektissa tiivistä yhteistyötä Aalto-yliopiston kanssa ja tarjonnut mm. pääsyn rikastamon tietokantaan, jotta adaptoituva simulaatiojärjestelmä on voitu kehittää toimimaan todellisen rikastusprosessin rinnalla. Pyhäsalmen kaivoksen päämineraalit ovat kalkopyriitti ja sfaleriitti (ks. kuva 1), joista saadaan jatkojalostuksessa kuparia ja sinkkiä. Simulaatiojärjestelmän testikohteena on käytetty Pyhäsalmen rikastamon kuparipiiriä. Outotec on myös ollut erittäin merkittävässä roolissa SOREX-projektissa ja tämän diplomityön kehityksessä, sillä työssä käytetään simulaatiojärjestelmän perustana Outotec HSC -ohjelmistoa. Outotec on lisäksi tarjonnut runsaasti apua ohjelmiston

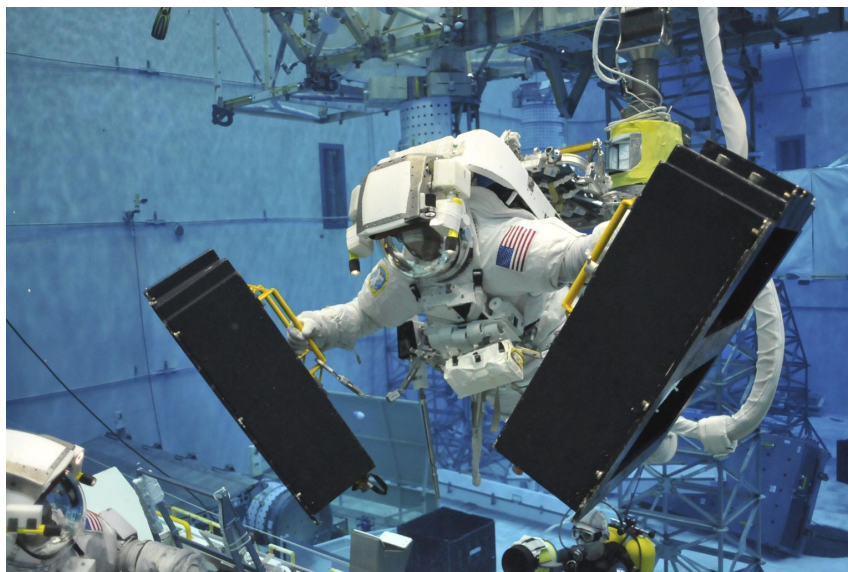
käytössä ja integroimisessa osaksi laajennettua simulaatiojärjestelmää.

Tässä työssä kehitetty adaptoituva simulaatiojärjestelmä on suunniteltu avustamaan rikastusprosessia valvovaa operaattoria kahdella tavalla. Simulaattorista on mahdollista nähdä sellaisten suureiden arvoja, jotka eivät ole itse prosessissa mitattavissa. Tämän lisäksi simulaatiojärjestelmä voi laskea ennusteita tulevista prosessisuureiden arvoista, jolloin operaattori voi ohjausvalinnoissaan ottaa nämä ennusteet huomioon. Projektissa on harkittu myös manuaalisten ohjausvalintojen simuloinnin lisäämistä ohjelmistoon, jotta operaattori voisi nähdä suoraan erilaisten ohjausten vaikutukset prosessiin ja valita tilanteeseen sopivimman vaihtoehdon. Tällaisia manuaalisia asetusarvomuutoksia tai suoria ohjauksia kuitenkin tehdään käyttöhenkilökunnan mukaan melko harvoin, joten se ei ole ollut työssä prioriteettina, ja pääpaino on ollut adaptoituvan simulaattorin kehityksellä ylipäätään.

Mineraalien rikastuksessa käytettävä nk. vaahdotusprosessi ei ole menetelmänä erityisen uusi, sillä se on keksitty jo 1800- ja 1900-lukujen vaihteessa. Tästä huolimatta sen toimintaperiaatetta ei täysin tunneta, eikä siitä näin ollen ole edelleenkään kovin tarkkaa fysikaalista mallia, joka osaisi selittää kaikki prosessissa tapahtuvat ilmiöt. Se on kuitenkin erittäin suosittu menetelmä ja monien mineraalien, kuten kuparin ja lyijyn, erotteluun verrattain tehokas prosessi. Erotteluprosessi on viimeinen vaihe mineraalin käsittelyketjussa kaivoksesta asiakkaalle, joten sen tehostaminen on kaivostoiminnasta saatavan hyödyn maksimoimiseksi hyvin tärkeää. Vaahdotusprosessien ohjausmenetelmiä onkin tutkittu melko paljon, mutta usein kokenut operaattori on silti äärimmäisen tärkeä prosessin onnistuneen ohjauksen kannalta. Automaattisten ohjausjärjestelmien kehityksen vaikeuteen osaltaan vaikuttaa myös täsmällisen fysikaalisen mallin puuttuminen. Adaptoituvan simulaattorin muodostama tarkka jäljitelmä todellisesta prosessista voisi olla avuksi tällaisissakin ongelmissa.

Työ on jaettu viiteen lukuun, jotka käsittelevät adaptoituvan simulaattorin muodostamista, vaahdotusprosessia sekä simulointituloksia. Luvussa kaksi esitellään adaptoituvan simulaatiojärjestelmän toiminnan perusperiaatteita sekä julkaistuja tutkimuksia adaptoituvan simulaattorin käytöstä muilta aloilta. Luku kolme käsittelee vaahdotusprosessin toimintaa ja sen mallintamista Outotec HSC-simulaattorissa sekä simulaattorin tärkeimpiä perusyhtälöitä. Neljäs luku esittelee simulaatiojärjestelmän yksityiskohtaista toimintaa ja rakennetta. Luvussa viisi esitetään simulaatiojärjestelmällä saavutettuja tuloksia, jotka on jaettu alilukuihin simulaatiotyyppien ja -ajojen mukaan. Viimeisessä luvussa tehdään yhteenveto työstä sekä pohditaan saavutettujen tulosten merkitystä ja adaptoituvaan simulaattoriin liittyvän tutkimuksen tulevaisuutta.

2 Aikaisempi tutkimus



Kuva 2: Astronautti harjoittelemassa avaruusaseman huoltotöitä simulaatiossa, jossa painottomuuden tunne saadaan aikaiseksi avaruuspukuun pumpatun ilman avulla. Lähde: NASA

Simulaatio on tuttu sana ja simulaattori lienee jo monelle arkinen työväline, mutta mikä oikeastaan on simulaatio? Eräs englanninkielinen määritelmä [3] kuuluu vapaasti suomennettuna näin:

Simulointi on järjestelmän kokeellista tutkimista seuraten yksinkertaistetun mallin toimintaa ajan suhteen.

Edellä esitetyn määritelmän perusteella tietokoneella tehtäviin simulaatioihin liittyy myös läheisesti järjestelmän toiminnan approksimointi matemaattisten mallien avulla ja tällaisten mallien luominen. Simulaatioita tehtäessä erilaisilla tavoilla, eli usein käytännössä erilaisilla fysikaalisilla ja matemaattisilla malleilla, voidaan päästä erilaisiin tarkkuuksiin. On kuitenkin selvää, että ei ole mitään tapaa mallintaa tietokoneen avulla monimutkaista järjestelmää, kuten vaahdotusprosessia, niin tarkasti, että kaikki mahdolliset siinä tapahtuvat ilmiöt voitaisiin ottaa huomioon. Nykyisen tieteellisen maailmankuvan mukainen ymmärrys fysikaalisen maailman toiminnasta on puutteellinen, joten simulaatiota tehdessä joudutaan väistämättä tyytymään siihen, että todellista järjestelmää voidaan vain approksimoida jollain tarkkuudella.

Tästä huolimatta simulaattoreita on käytetty jo pitkään lukuisilla tieteen ja teollisuuden aloilla ja suunta lienee vain kasvamaan päin. Yleensä simulaatioita tehdään tietokoneiden avulla käyttäen hyväksi niiden yliverstaista kykyä suorittaa matemaattisia laskutoimituksia, joilla simuloitavaa systeemiä mallinnetaan. Kuvasta 2 kuitenkin nähdään, että vaihtoehtoisiaakin tapoja simulaatioiden suorittamiseen on

olemassa. Kuvassa astronautti harjoittelee avaruuspuvun käyttöä simuloidussa painottomuuden tilassa, joka aiheutetaan pumppaamalla avaruuspukuun sopiva määrä ilmaa siten, että noste ja painovoima kumoavat toisensa [4]. Tällaiset ilman tietokonetta suoritettavat simulaatiot ovat toki hyvin pienessä osassa etenkin, jos puhutaan simulaattorien käytöstä teollisuudessa.

Vaikka simulaattoreita käytetään nykyään lähes kaikilla aloilla myös teollisuudessa, niiden käyttötarkoitukset eivät kuitenkaan ole lainkaan niin moninaisia. Yleensä simulaattoreita käytetään apuna uuden prosessin suunnitteluvaiheessa tai operaattoreiden koulutuksessa. Kalliin ja monimutkaisen prosessin toiminnan varmistaminen ja optimoiminen simuloinnin avulla on usein kustannustehokasta, koska tällöin prosessin käynnistämisvaiheessa oletettavasti säästytään ainakin osalta niistä ongelmista, jotka olisivat muutoin jääneet huomaamatta. Operaattoreiden kouluttamisessa simulaattorien avulla on ilmeisiä etuja: harjoittelijan virheet eivät aiheuta taloudellisia menetyksiä, vaikka ohjausvalinnat olisivat epäonnistuneita, eikä kenenkään terveys ole vaarassa, vaikka simuloitu ydinreaktori pääsisi ylikuumentumaan.

Edellä on mainittu kaksi hyvin yleistä simulaattorien käyttökohdetta, mutta tämän työn aiheeseen liittyy erään uuden käyttötavan tutkiminen. Kuvitelkaamme, että voisimme tehdä äärimmäisen tarkan simulaattorin, jonka vaste on täsmälleen sama kuin oikean prosessin. Tällaisella simulaattorilla voitaisiin ajatella tutkittavan esimerkiksi prosessin tilaa nykyhetken ympäristössä ja erityisesti lähitulevaisuudessa. Ajatus ei ole kovin kaukaa haettu, jos ajatellaan, että vaikkapa epälineaarisen funktion linearisoinnissa idea on samankaltainen. Tällöin tutkitaan epälineaarisesta funktiosta mahdollisimman hyvin tiettyjen sääntöjen mukaan muodostetun approksimaation, eli linearisoidun funktion, käyttäytymistä valitun pisteen lähiympäristössä. Tässä tarkastellaan mahdollisimman tarkasti muodostetun simulaattorin käyttäytymistä nykyhetken ympäristössä. Yksi käyttökohde edellä kuvitellulle äärimmäisen tarkalle simulaattorille voisi olla erilaisten ohjausvaihtoehtojen vertailu. Kokematon prosessioperaattori voisi käyttää simulaattoria vertaillakseen eri ohjausten vaikutuksia prosessin tilaan ja vasteeseen voidakseen valita parhaan mahdollisen ohjaustoimenpiteen. Prosessissa voi myös olla suureita, jotka eivät ole mitattavissa, mutta niiden seuraamisesta tai tuntemisesta olisi hyötyä esimerkiksi prosessin ohjauksen kannalta. Näitä voitaisiin seurata simulaattorin avulla. Olennaista on kuitenkin se, että simulaattorin täytyy käyttäytyä riittävän samankaltaisesti oikean prosessin kanssa, jotta siitä olisi hyötyä.

Edellä kuvatun kaltaisen simulaation laatiminen ei kuitenkaan ole täysin triviaalia, sillä siihen liittyy muutamia ongelmia. Esimerkiksi tämän työn kohteena olevassa vaahdotusprosessissa syötteen ominaisuudet vaikuttavat jonkin verran prosessin ja siten myös simulaation toimintaan. Tämä on toki aika järkeenkäypää, sillä onhan prosessin ideana erotella arvomineraaleja sivukivistä, jolloin toimintaa ohjaa pitkälti se, kuinka paljon ja millaisia mineraaleja syötteessä on, ja kuinka paljon niissä on vaihtelua. Tällöin pitkälle ulottuvan ennusteen laskeminen tulevia syötteitä tuntematta on vaikeaa. Ylipäänsä äärimmäisen tarkan simulaation laatiminen mistään prosessista on vähintäänkin haastavaa tai jopa mahdotonta, sillä kaikkien reaalimaailman ilmiöiden huomioiminen ei vain tällä hetkellä ole käytännössä mahdollista, eikä kaikkia prosesseihin vaikuttavia ilmiöitä edes ymmärretä täysin. Vaikka täydellis-

tä simulaatiota ei pystyttäisikään luomaan, niin olisi kiinnostavaa kuitenkin nähdä, kuinka tarkka simulaattori tällä tavoin pystyttäisiin rakentamaan, ja millaisia tuloksia sillä voitaisiin saada. Pohditaan siis ensin, miten tällaista tarkkaa simulaattoria voitaisiin lähteä rakentamaan, ja luodaan sen jälkeen katsaus kahteen samantyyppiseen tutkimukseen, jotta saataisiin jonkinlainen kuva siitä, millaisia ponnisteluja ongelman parissa on aiemmin tehty.

2.1 Prosessin rinnalla ajettava adaptoituva simulaattori

Simulaattorin tarkkuus perustuu yleensä siihen, kuinka tarkasti sen kohteena oleva prosessi tai ilmiö on mallinnettu. Mikäli prosessi tunnetaan hyvin ja se on yksinkertainen, simulaatiosta on helppo tehdä hyvinkin tarkka ottamalla huomioon kaikki siihen vaikuttavat ilmiöt ja mallintamalla ne matemaattisten yhtälöiden avulla. Toisinaan kuitenkin on prosesseja, jotka ovat erittäin isoja ja monimutkaisia, eikä niiden teoriaakaan ymmärretä täysin. Tähän jälkimmäiseen kategoriaan kuuluu myös vaahdotusprosessi, joka on otettu käyttöön jo 1900-luvun vaihteessa, mutta kaikkia siihen liittyviä ilmiöitä ei vielä tänä päivänäkään täysin ymmärretä. Jotta tällaista prosessia voitaisiin simuloida tarkasti nykyisten fysikaalisten mallien perusteella, tarvitaan uusia ideoita, ja tällainen on esimerkiksi nk. adaptoituva simulaattori. Adaptoituva simulaattori perustuu dynaamiseen simulaatioon, jonka parametreja voidaan tarvittaessa ajon aikana muokata kevyesti, jotta simulaattorin vaste saadaan yhteneväksi todellisen prosessin kanssa. Adaptoituvaa simulaattoria ajetaan siis todellisen prosessin rinnalla, ja sen tiettyjä tarkoitukseen sopivia parametreja adaptoidaan jatkuvasti.

Adaptoitavan simulaattorin perustana voidaan käyttää jotakin yleiskäyttöön tarkoitettua dynaamista simulaattoria tai simulaatio-ohjelmistoa. Tähän tarkoitukseen sopivan simulaattorin voi tehdä millä tahansa ohjelmointikielellä tai vaikkapa Matlabilla, tai vaihtoehtoisesti voidaan valita jokin kaupallinen simulaattori. Valitun simulaattorin täytyy jo valmiiksi vastata mahdollisimman hyvin simuloitavaa prosessia, sillä tällöin simulaattorin parametreja ei tarvitse muokata kovin voimakkaasti, ja lopputulos on oletettavasti ainakin ennusteiden osalta parempi. Jos simulaattori vastaa huonosti simuloitavaa prosessia, simulaattorin vaste voidaan saada prosessin rinnalla ajettaessa hyvin tarkaksi säätämällä parametreja voimakkaasti, mutta tällöin simulaattorilla lasketun ennusteen ei voida odottaa kuvaavan kovin tarkasti todellisen prosessin vastetta.

Mitä edellä mainittu simulaattorin dynaamisuus sitten tarkoittaa? Tietokonesimulaatiot ja simulaattorit voidaan jaotella staattisiin ja dynaamisiin simulaattoreihin. Kyseinen erottelu on tämän työn kannalta olennainen ja se palautuu lopulta eroon staattisten ja dynaamisten järjestelmien tai niitä kuvaavien mallien välillä. Staattinen järjestelmä on nimensä mukaisesti tietyssä mielessä muuttumaton, sillä tällaiset järjestelmät ovat sisäisesti vakioita ajan suhteen. Dynaaminen järjestelmä sisältää ajan suhteen muuttuvia komponentteja myös järjestelmässä itsessään. Toisaalta kannattaa huomioida, että tasapainotilassa olevaa dynaamista järjestelmää voidaan simuloida staattista mallia käyttäen.

Sama ajatus pätee adaptoituvassa simulaatiossa käytettävään simulaattoriin, jon-

ka siis tulee tässä tapauksessa olla dynaaminen. Sillä täytyy olla sisäistä dynamiikkaa ja hitautta. Ehkäpä tässä yhteydessä voitaisiin käyttää myös sanaa muisti. Tällöin ennusteeseen vaikuttavat myös simulaation menneet arvot ja simulaation tila. Vaahdotusprosessin tapauksessa tämä tarkoittaa myös sitä, että prosessi ja yksittäiset vaahdotuskennnot eivät välttämättä ole, eikä niiden tarvitse olettaa olevan, jatkuvasti tasapainotilassa. Tähän perustuu myös ajatus siitä, että simulaattorilla voitaisiin laskea tulevien ajanhetkien ennusteita siten, että syöte ja ohjaukset voitaisiin jättää viimeiseen arvoon, jossa ne olivat ennusteen laskentaa aloitettaessa.

Toinen tärkeä seikka adaptiivisen simulaattorin rakentamisessa on adaptointiparametrien valinta. Simulaattorista täytyy valita sellaiset parametrit, joilla voidaan vaikuttaa juuri haluttuihin vasteisiin. Tämä tarkoittaa siis sitä, että koska simulaattorissa ei voida koskaan ottaa huomioon kaikkia oikeaan prosessiin vaikuttavia seikkoja, valittuja parametreja hienosäätämällä simulaattorin vaste voidaan pakottaa samaan oikean prosessin kanssa. Tällaisten parametrien löytäminen ja valinta ei ole lainkaan triviaali tehtävä, ja se vaatii hyvää tuntemusta sekä simuloitavasta prosessista että käytettävästä simulaattorista. Valittujen parametrien tulee mielellään olla sellaisia, että ne vaikuttavat vain haluttuihin vasteisiin. Muussa tapauksessa ristikkäisvaikutukset täytyy ottaa huomioon adaptointialgoritmissa.

Jotta simulaattorin ja prosessin vasteita voidaan verrata, tarvitaan yhteys prosessitietokantaan. Tietokannasta voidaan hakea vasteiden lisäksi syötearvot ja tarvittaessa muita tietoja, joita voidaan hyödyntää simulaattorissa. Pääsy prosessitietokantaan on usein rajattu yrityksen sisäiseen verkkoon, joten simulaattorikoneen sijoittamisessa tehtaan tiloihin on selkeitä etuja. Mikäli niin ei haluta tehdä, voidaan luoda esimerkiksi VPN-yhteys (Virtual Private Networking) yrityksen verkkoon, ja näin voidaan päästä tekemään tarvittavat tietokantakyselyt myös kaukaisemmasta sijainnista.

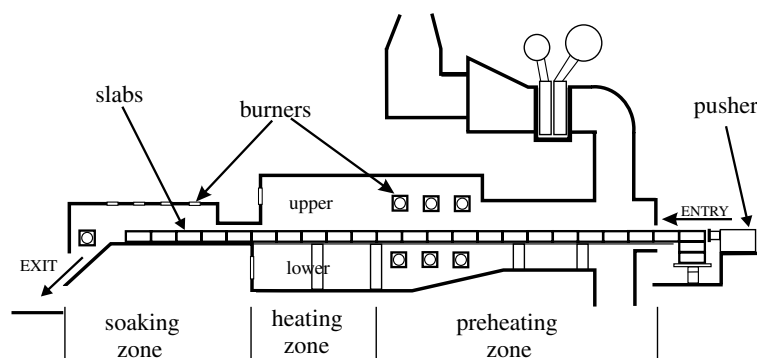
Edellä on esitetty kootusti ne osat, joista adaptoituva prosessin rinnalla ajettava simulaattori voidaan rakentaa. Perustaksi tarvitaan dynaaminen simulaattori, josta luodaan tietokantayhteys tehtaalle vasteiden sekä syötteiden hakemista varten. Simulaattorista valitaan sellaiset parametrit, joilla voidaan vaikuttaa juuri haluttuihin vasteisiin. Jäljelle jää enää kysymys siitä, kuinka parametreja tulee muokata, jotta vasteet saadaan mahdollisimman lähelle toisiaan. Reinsalo tutkii diplomityössään [5] erilaisia algoritmeja, joita voidaan käyttää dynaamisen simulaattorin adaptointiin erityisesti vaahdotusprosessin tapauksessa. Pienimmän neliösumman menetelmä (LMS) [6] on hyvin laajalti käytetty algoritmi estimoinnissa ja se sopii tähänkin ongelmaan pienin variaatioin oikein hyvin. Reinsalo tutkii erityisesti rekursiivisen pienimmän neliösumman (RLMS) sekä normalisoidun (NLMS) pienimmän neliösumman menetelmien käyttöä. Toisaalta tällaiseen tehtävään voidaan käyttää myös yksinkertaista ja hyväksi havaittua PID-säädintä [11].

2.2 Prosessin rinnalla ajettava simulaattori terästehtaan uunin ohjauksessa

Ensimmäinen esimerkki prosessin rinnalla ajettavasta simulaattorista liittyy terästehtaan kuumavalssausta edeltävään teräksen uudelleenlämmitykseen. Kuumaval-

saus on prosessi, jossa paksu teräslevy kuumennetaan jälleenkiteytymislämpötilan yläpuolelle ja puristetaan pyörivien telojen välistä, jolloin teräs muotoutuu halutulla tavalla. Usein näin tuotetaan ohutta, tasaista teräslevyä, kuten tässä selostettavan tutkimuksen kohteena olevassa prosessissa tehdään, mutta erikoisempiakin muotoja, kuten vaikkapa rautatiekiskoja, voidaan tehdä samalla tavoin. Prosessin onnistumisen kannalta on erityisen tärkeää, että lämmitetyn aihion lämpötila pysyy mahdollisimman hyvin vakiona koko teräslaatan tilavuuden yli. Mikäli lämpötila vaihtelee alueittain, teräslevyn puristuminen ei tapahdu samalla tavoin kaikissa kohdissa vaan lämpimämmät alueet muovautuvat enemmän, jolloin saatava teräs ei ole tasalaatuista. Tällöin teräksen paksuus saattaa vaihdella ja erityisesti pinnasta tulee huonolaatuinen. Äärimmäisissä tapauksissa puristettuun teräslevyyn saattaa jopa tulla repeämiä.

Ennen valssausta teräsaihiot uudelleenkuumennetaan läpityöntöuunissa. Uuni toimii siten, että teräslevyt kulkevat jäähdytettyjen kiskojen päällä ja työntävät jokainen edellään olevaa levyä eteenpäin. Tätä havainnollistetaan kuvassa 3. Koska tavoitteena on kaikkien teräslevyjen kuumentaminen tasaisesti tiettyyn lämpötilaan, uunin polttimet ja niiden ohjaus ovat tässä erityisen kiinnostuksen kohteena. Eri teräslajit tulee kuitenkin lämmittää eri lämpötiloihin, ja lisäksi teräsaihiot eivät aina ole samanlevyisiä eivätkä niiden lämpötilat ole uuniin mennessä samoja, mikä tekee uunin ohjauksesta haasteellisen tehtävän.



Kuva 3: Havainnekuva terästehtaan uunista. [8]

Jaklic et al. [8] ovat tutkineet teräslevyjen lämmitysongelmaa Acronin terästehtaalla Sloveniassa uudesta näkökulmasta dynaamisen online-simulaation avulla. Uunin ohjauksessa teräslevyjen tasaista lämmitystä varten tarvitaan tieto kunkin teräslevyn lämpötilajakaumasta lämmityksen aikana, mutta valitettavasti aihoiden lämpötilojen mittaaminen uunin sisällä ei ole aina mahdollista. Tässä tapauksessa onkin päädytty kokeilemaan simulaatiota lämpötilojen estimointiin. Simulaatio perustuu uunista luotuun tarkkaan matemaattiseen malliin, jossa otetaan huomioon pääasialliset fysikaaliset ilmiöt. Lämmön siirtyminen aihioihin tapahtuu osin kaasusta teräkseen ja toisaalta säteilemällä uunin seinistä, ja uunin muodolla onkin suuri vaikutus lämmösiirtoon.

Tutkimuksessa selitetään hyvin seikkaperäisesti, kuinka lämpövuot voidaan laskea, mutta näiden yhtälöiden läpikäyminen tässä ei liene tarkoituksenmukaista. Mai-

nittakoon kuitenkin, että matemaattisen mallin ja siten myös simulaation ydin koostuu muotokerroinmatriiseista, jotka kuvaavat efektiivistä lämmön säteilyä eri kapaleiden välillä. Simulaatio on jaettu aihioden levyisiin alueisiin ja kaasun lämpötilan ja koostumuksen approksimoidaan olevan vakio yhdessä alueessa. Tärkeimpänä mittauksena tässä pidetään uunin seinän lämpötilan mittausta.

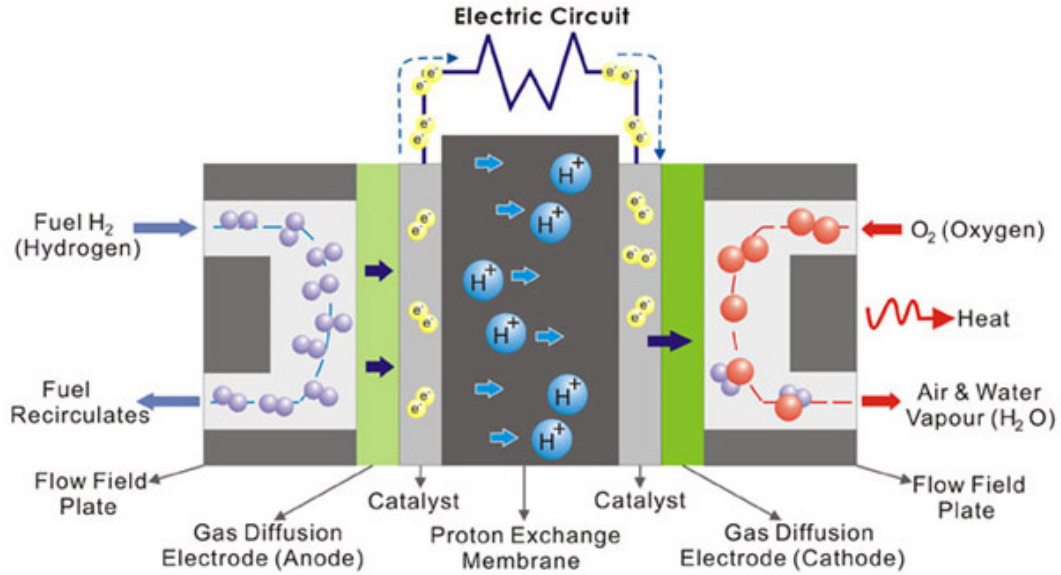
Simulaatiotietokone on yhdistetty tehtaan sisäverkkoon, jonka kautta sillä on yhteys muuhun informaatiojärjestelmään ja erityisesti prosessitietokoneeseen. Täältä simulaattori saa ajantasaiset mittaustiedot mm. uunin seinien lämpötiloista ja polttimien polttoaineen sekä ilman kulutuksesta. Myös tiedot aihioden mitoista sekä teräslajeista saadaan prosessitietokoneelta. Tiedot päivitetään 60 sekunnin välein ja siirretään simulaatiokoneelle FTP-protokollaa käyttäen.

Tämä simulaattori eroaa kuitenkin edellisessä alaluvussa esitellystä adaptoituvan simulaattorin mallista hieman, sillä jatkuvan adaptoinnin sijasta kyseinen simulaattori on kalibroitu ennalta. Tämä tarkoittaa sitä, että on tehty testiajo, jossa olosuhteet on määritetty tarkoin. Testiajossa on selvitetty ennalta teräslevyn eksaktit mitat, teräslaji sekä tehty mahdollisimman tarkat mittaukset tai estimaatit uunin seinien ja kaasun lämpötiloille sekä muille tarvittaville suureille. Testiaihion sisään on kiinnitetty lämpötila-antureita (termopareja), joiden avulla saadaan mitattua lämpötilajakauma teräslevyn sisällä kuumennuksen aikana. Testiajon jälkeen simulaattorin parametreja on muokattu niin, että simulaatitulos on saatu sovitettua mitattuun lämpötilajakaumaan. Yhteys tämän työn aiheeseen löytyy siitä, että käsiteltyssä tutkimuksessa kohteena on nimenomaan prosessin rinnalla ajettava dynaaminen simulaatio. Tutkimuksen mukaan simulaattorista on ollut hyötyä terästehtaalla ja se on otettu normaliin käyttöön parantamaan tuotetun teräslevyn laatua.

2.3 Prosessia seuraava simulaattori polttokennon ohjauksessa

Toisessa valitussa esimerkissä käsitellään todella adaptoituvaa simulaattoria tai toisin sanoen prosessin rinnalla ajettavaa seuraavaa simulaattoria (on-line tracking simulator), kuten tätä kyseisessä tutkimuksessa kutsutaan. Kawaguchi et al. [11] ovat tutkineet polttokennon mallipohjaista ohjausta adaptoituvan simulaattorin avulla. Polttokennon tyyppi on nk. polymeerielektrolyyttimembraanipolttokenno, jonka toiminta tunnetaan muuten hyvin, mutta membraanin kosteuden hallinta on vaikeasti mallinnettava ilmiö. Membraani tarvitsee tietyn määrän kosteutta toimiakseen, mutta liiallinen kosteus aiheuttaa tulvimiseksi kutsutun ilmiön, jolloin kennon antojännite romahtaa. Mallipohjaisen säädön apuna käytetään siis tässä matemaattisen mallin lisäksi adaptoituvaa simulaatiota, jolla voidaan selittää myös veden aiheuttama käyttäytyminen.

Käydään kuitenkin ensin hyvin lyhyesti läpi polymeerielektrolyyttimembraanipolttokennon toimintaperiaate. Polttokennon rakenne näkyy kuvassa 4, ja sen tärkeimmät osat ovat anodi, katodi ja niiden välissä oleva membraani. Anodille johdetaan vetykaasua, joka hajoaa protoneiksi ja elektroneiksi. Membraani päästää protonit kulkemaan lävitseen, mutta elektronit johdetaan ulkoiseen piiriin tekemään

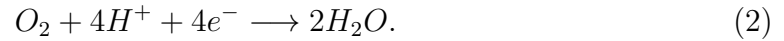


Kuva 4: Polttokennon toimintaperiaate. Lähde: G-Energy Technologies

työtä. Katodille johdetaan happea, jolloin membraanin läpi kulkeneet protonit ja ulkoisen piirin kautta katodille johdetut elektronit muodostavat hapen kanssa vettä. Kemiaallinen reaktio anodilla on: [10]:



Katodilla tapahtuva reaktio on puolestaan:



Kennoa ohjataan säätämällä kaasujen virtausta ja kennon lämpötilaa. Vetykaasun virtaus anodille ja ilman virtaus katodille vaikuttavat ensisijaisesti tapahtuvien reaktioiden määrään. Kennon lämpötilan avulla voidaan säätää membraanin suhteellista kosteutta. Koska ohjaukseen käytetään mallipohjaista säätöä, ideana on estimoida kennon antojännite suhteessa virtaan mahdollisimman hyvin kaikissa tilanteissa. Kennon simulaatiomalli on ensin kalibroitu matalan kosteuden tapauksessa, jonka jälkeen voidaan käyttää adaptiivista simulaatiota pitämään simulaattori tarkkana myös korkean kosteuden tapauksessa. Avoimen piirin jännite voidaan laskea nk. Nernstin yhtälöllä [11]:

$$E_{oc} = -\frac{\Delta g^0(T)}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln\left[\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}}\right], \quad (3)$$

missä Δg^0 on Gibbsin vapaaenergia veden muodostumisessa standardipaineessa, T on lämpötila, R on kaasuvakio ja F on Faradayn vakio. Jälkimmäinen termi kuvaa Gibbsin vapaaenergian muutosta paineiden suhteen. Tämä ei kuitenkaan ole kennon antojännite, sillä se on teoreettista Nernstin jännitettä pienempi [11]:

$$v = E_{oc} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{con}, \quad (4)$$

missä η_{act} on aktivoinnin ylijännite, η_{ohm} on ohminen ylijännite ja η_{con} on elektrolyytin konsentraatiosta riippuva ylijännite. Käytännössä nämä voidaan selvittää koeajojen avulla. Näistä kiinnostavin on ohminen ylijännite, joka kuvaa ionien kykyä kulkea elektrolyytin läpi [11]:

$$\eta_{ohm} = \frac{\tau^{mem}}{\sigma^{mem}}, \quad (5)$$

missä τ^{mem} on elektrolyytin paksuus ja σ^{mem} on elektrolyytin ionijohtavuus. Elektrolyytin johtavuus riippuu hyvin vahvasti veden määrästä, joten se on hyvä kandidaatti adaptoitavaksi suureeksi. Tässä käytössä olevalle Nafion 117 membraa-nille voidaan laskea ionijohtavuus [11]:

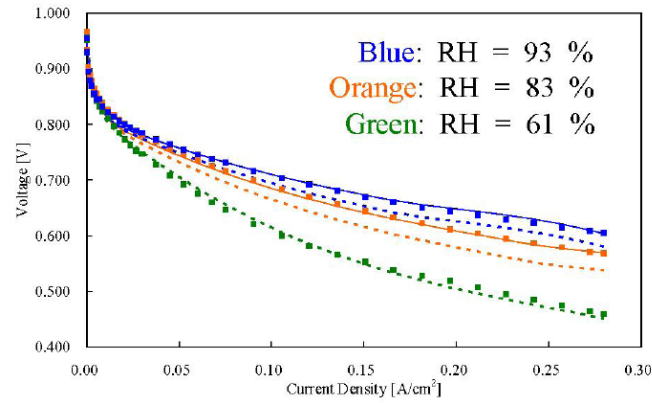
$$\sigma^{mem} = (b_{11}\lambda - b_{12}) \exp[b_2(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})], \quad (6)$$

missä b_{11} , b_{12} ja b_2 selvitetään kokeellisesti aiemmin mainitun kalibroinnin avulla tietyssä kosteudessa. Jotta simulaattori pysyisi tarkkana myös suhteellisen kosteuden muuttuessa, Kawaguchi et al. ovat valinneet suureen b_{11} adaptoitavaksi parametriksi, jota siis päivitetään ajon aikana:

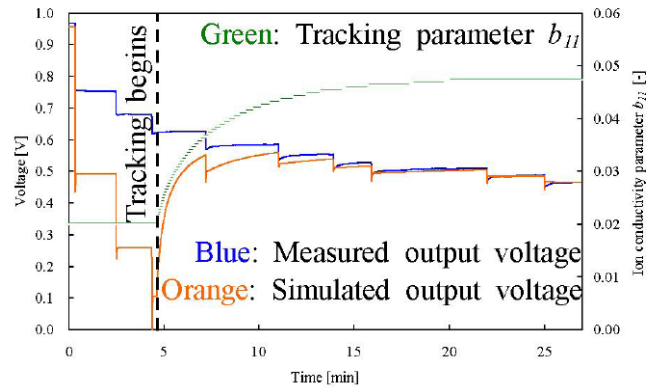
$$\begin{cases} b_{11}(t) = b_{11}(t-1) + \Delta b_{11} \\ \Delta b_{11} = K_p e + K_i \int e dt \\ e = y^{mes} - y^{sim} \end{cases}, \quad (7)$$

missä y^{mes} on mitattu vaste ja y^{sim} on simuloitu vaste. Edellä kuvattujen yhtälöiden avulla lasketaan joka simulaatiokierroksella adaptoitavalle suurelle b_{11} uusi arvo, jolla mitatun ja simuloidun vasteen ero saadaan mahdollisimman pieneksi.

Tutkimuksen tuloksena havaitaan, että adaptoitava simulaattori pystyy estimoimaan polttokennon antojännitteen suhteessa sähkövirran tiheyteen. Kuvassa 5 on merkitty eri kosteusolosuhteissa oikeasta systeemistä mitattu tulos pisteinä, simuloitu tulos ilman adaptointia katkoviivalla ja adaptoituvalla simulaattorilla saatu tulos yhtenäisellä viivalla. Tässä nähdään selvästi, että kosteudessa 61 %, jossa simulaattori on kalibroitu, tavallinen simulaattori on tarkka, mutta kosteuden muuttuessa vain adaptoituva simulaattori kykenee estimoimaan antojännitteen tarkasti. Toinen kuvaaja (kuva 6) havainnollistaa hyvin adaptoinnin toimintaa ja näyttää antojännitteen sekä erityisesti adaptoitavan parametrin muuttumisen ajan funktiona, kun adaptointi kytketään päälle.



Kuva 5: PEM-polttokennon virta-jännite -kuvaaja eri kosteusolosuhteissa. Polttokennosta mitatut tulokset on merkitty pisteillä, ilman adaptointia simuloidut tulokset katkoviivalla ja adaptoituvalla simulaattorilla saadut tulokset on merkitty yhtenäisellä viivalla. [11]



Kuva 6: Mitattu ja simuloitu antojännite sekä adaptoitavan parametrin arvo, kun adaptointi kytketään päälle kesken simulaation. [11]

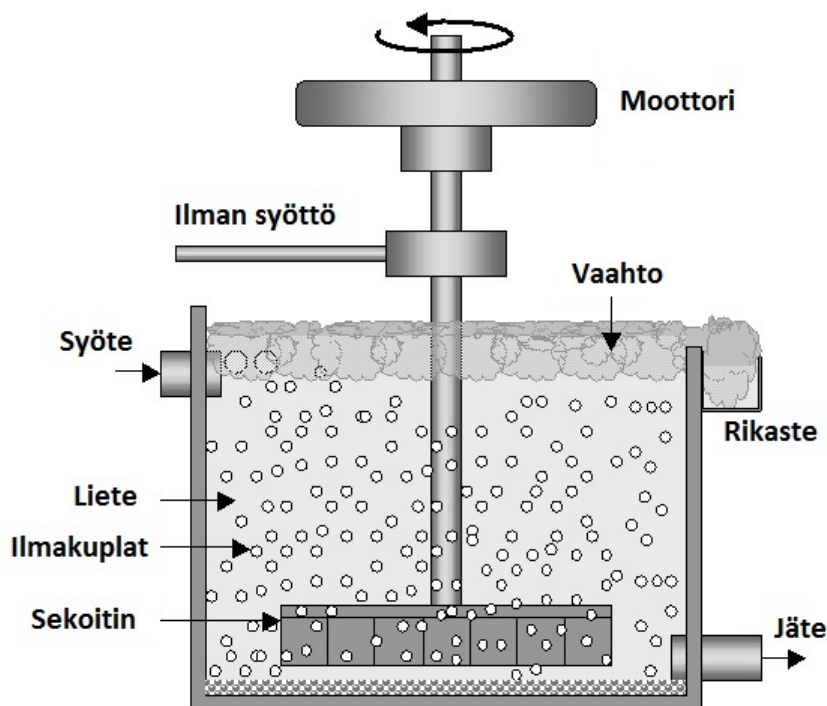
3 Vaahdotusprosessi ja sen mallintaminen

Tässä diplomityössä käsitellään vaahdotusprosessin simulointia, joten on hyvä myös käydä läpi lyhyesti kohteena olevan prosessin pääperiaatteet käyttäen esimerkkinä Pyhäsalmen kaivoksen rikastamon toimintaa. Vaahdotusprosessin päämäärä on erotella arvokkaat mineraalit muusta kiviaineksesta siten, että rikasteen pitoisuus on korkea ja samalla talteen saadun arvomineraalin saanti on mahdollisimman lähellä 100 prosenttia. Esimerkiksi tässä projektissa mukana olleen Pyhäsalmen kaivoksen kuparin vaahdotuksessa saanti on vuosina 2005-2009 ollut keskimäärin 95 % ja rikasteen kuparipitoisuus on ollut 29 % [16]. Nämä ovat erinomaisia tuloksia ottaen huomioon, että kuparikiisun alkuainekoostumus (CuFeS_2) asettaa 34,6 %:n teoreettisen ylärajan kuparipitoisuudelle.

Koska vaahdotusprosessia voidaan soveltaa vain hienoksi jauhetun kiviaineksen käsittelyyn ja erotteluun, kaivoksesta louhittu malmi johdetaan ensin murskainten kautta jauhinyhdyksiin, joissa se jauhetaan hyvin hienoiksi partikkeleiksi. Jauhinkivinä myllyissä käytetään joko isompia lohkaraita tai tarkoitukseen erityisesti valmistettuja kuulia. Jauhettujen partikkelien koko vaikuttaa vaahdotusprosessin onnistumiseen, ja optimikoko vaihtelee hieman riippuen rikastettavasta mineraalista, mutta kokoluokka vaihtelee noin kymmenestä muutamaan sataan mikrometriin. [12] Pyhäsalmen murskauksen jälkeinen jauhatuspiiri toimii kolmessa osassa: primaari-, sekundaari- ja tertiaarijauhatusessa. Primaari- ja sekundaarijauhatusessa käytetään sekä lohkaraita että kuulia, ja viimeisessä vaiheessa vain kuulia. Pyhäsalmen vuonna 2012 keskimäärin 67 % jauhatusuotteesta oli raekooltaan alle $74\text{ }\mu\text{m}$ ja 43 % alle $37\text{ }\mu\text{m}$ [17].

Vaahdotusprosessi toimii yksinkertaistetusti siten, että mineraalirakeet sekoitetaan veteen, jolloin saadaan nestemäistä lietettä. Tämä liete johdetaan suureen säiliöön, jossa lietettä sekoitetaan jatkuvasti, jotta syöte sekoittuisi mahdollisimman täydellisesti jo säiliössä olevaan lietteeseen ja jotta mineraalirakeet jakautuisivat mahdollisimman tasaisesti säiliön lietteeseen. Säiliöön pumpataan lisäksi ilmaa, joka muodostaa lietteeseen ilmakuplia. Halutut mineraalit saadaan tarttumaan ilmakupliin, ja ne nousevat kuplien mukana pintaan, josta ne kaavitaan talteen. Tämä prosessi näkyy kuvassa 7, joka esittää yhden vaahdotuskennon toimintaa.

Tarkemmin kuvattuna vaahdotusprosessin toiminta perustuu kolmeen fysikaalis-kemialliseen ilmiöön, joista tärkein on nk. *true flotation*, jolla tarkoitetaan arvomineraalien tarttumista vaahdotuskennoon pumpattuihin ilmakupliin. Tämä vastaa hyvin suurta osaa kaikesta talteen saatavasta mineraalista. Toinen mineraalin saantiin vaikuttava ilmiö on *entrainment*, jolla tarkoitetaan veden mukana vaahtokerrokseen siirtyvää kiviainesta. Vettä kulkeutuu vaahtokerrokseen sen muodostaessa kalvoja kuplien pinnalle. Viimeinen ilmiö tunnetaan nimellä *entrapment* ja se tarkoittaa toisien partikkelien väliin puristuksiin jääneiden mineraalien nousemista vaahtoon ja siten rikasteeseen. Huomionarvoista on, että näistä ainoastaan ensimmäinen ilmiö on selektiivinen, eli se valitsee ja nostaa rikasteeseen vain sellaisia haluttuja arvomineraaleja, jotka ovat tai jotka on tehty hydrofobisiksi ja jotka prosessissa käytännössä halutaan erottaa rikasteeseen. Kaksi muuta ilmiötä nostavat rikasteeseen yhtä lailla niin kaikkia muita arvomineraaleja kuin sivukiveäkin, eikä niiden keskinäisiin



Kuva 7: Kaaviokuva vaahdotuskennon toiminnasta. Mineraalit sisältävä syöte sekoitetaan mahdollisimman täydellisesti säiliöön, johon pumpataan myös ilmaa, jolloin hydrofobiset mineraalirakeet nousevat ilmakuplien mukana pintaan. [13] (muokattu)

määriin voida vaikuttaa kovinkaan paljon. Tämän vuoksi vaahdotusprosessi koostuu usein monesta vaiheesta, jossa edellisen vaahdotuskennon rikaste menee aina uuteen vaahdotuskennoon. [12]

Ilmakuplien stabiilius on vaahdotusprosessissa hyvin tärkeää. Jos ilmakuplat eivät olisi kestäviä, ne hajoaisivat heti pintaan tultuaan, jolloin arvomineraalit vajoisivat takaisin lietteeseen. Lietteeseen täytyy sekoittaa kemikaaleja, jotka tekevät kuplista sopivan kestäviä, mutta tässäkin täytyy säilyttää tasapaino, sillä liian kestävät kuplat johtavat siihen, että kennon päältä kaavittu vaahto ei muutu takaisin lietteeksi vaan pysyy vaahtona, jonka käsittely ja johtaminen kennosta toiseen tuottaa vaikeuksia. Kuvassa 8 näkyy vaahdotuskennon pintaan muodostuneita kuplia. Vaahdotteina käytetään usein happoja, amiineja tai alkoholeja, sillä nämä liukenevat melko hyvin veteen ja siten myös sekoittuvat hyvin lietteeseen. Yleensä on myös toivottavaa, ettei vaahdote vaikuta mineraalien vaahdottuvuuteen, sillä tämä voi vaikeuttaa selektiivisen vaahdotuksen onnistumista. [12]

Kuten jo aiemmin kävi ilmi, halutun mineraalin tarttuminen ilmakupliin perustuu siihen, että mineraali on hydrofobinen, eli se hylkii vettä. Kaikki mineraalit eivät kuitenkaan ole luonnostaan tällaisia, joten lietteeseen lisätään tarvittaessa kemikaaleja, joilla halutun mineraalin pinta saadaan hydrofobiseksi. Tällaisia kemikaaleja kutsutaan *kokoajiksi*, ja ne toimivat muodostamalla ohuen hydrofobisen kalvon mineraalin pinnalle. Usein lietteessä on useita mineraaleja, joita ei haluta rikasteeseen,



Kuva 8: Kuva vaahdotuskennon pinnasta. Hyötymineraalit ovat tarttuneet pinnalle nousseisiin kupliin, josta ne voidaan kaapia talteen.

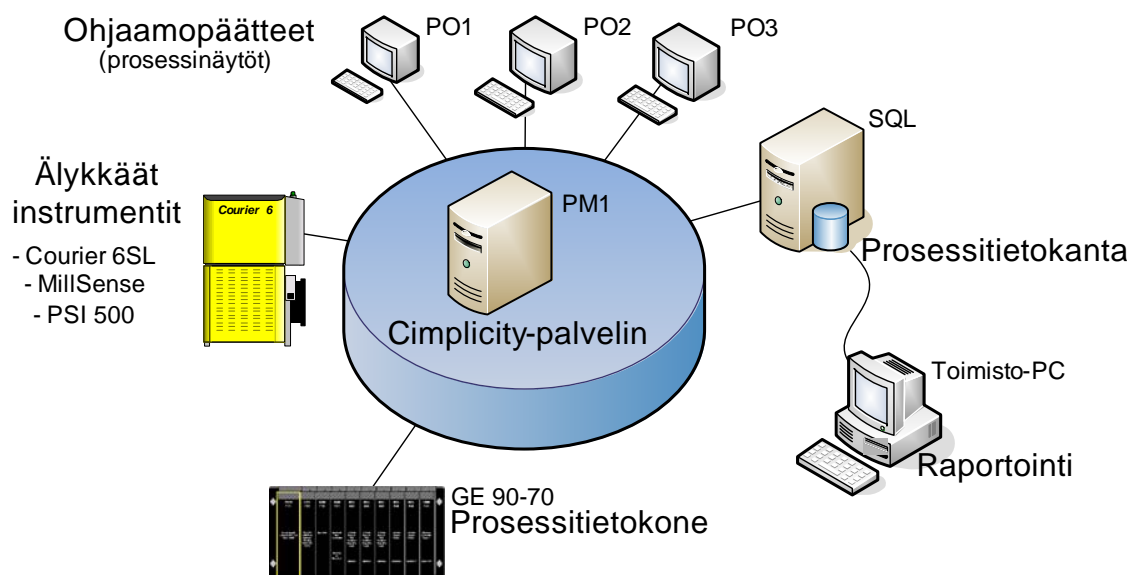
joten näiden pinta pyritään saamaan hydrofiiliseksi. Tällaisia yhdisteitä kutsutaan *painajiksi*. Mineraalien nousemiseen vaikuttaa vahvasti myös lietteen pH-arvo. Monet mineraalit vaahdotuvat parhaiten emäksisessä liuoksessa, mutta esimerkiksi pyriitin (FeS_2) vaahdotus vaatii happaman pH:n.

Esimerkkinä käytetyn Pyhäsalmen kuparipiirin vaahdotusprosessin syötteen päämineraalit ovat kuparikiisu, sinkkivälke ja pyriitti, joiden lisäksi malmissa esiintyy lyijyhohdetta sekä pieniä määriä muita mineraaleja. Onnistuneen ja selektiivisen vaahdotuksen varmistamiseksi prosessiin lisätään useita kemikaaleja, kuten kuparin kokoojana käytettävää isobutyryliksantaattia (NaIBX). Kuparivaahdotuksessa lietteen optimaalinen pH on 12, jonka saavuttamiseksi käytetään kalkkia, joka toimii samalla pyriitin painajana. Sinkkiä painetaan sinkkisulfaatin (ZnSO_4) avulla, sillä lietteessä olevat kupari-ionit pyrkivät aktivoimaan muuten suhteellisen huonosti vaahdotuvaa sinkkivälkettä. Sinkin ja pyriitin painamiseen käytetään myös syanidia (NaCN), mutta sitä käytetään vain viimeisissä kertausvaahdotusvaiheissa ja pieniä määriä, sillä se voi painaa myös kuparikiisua. Kaikki kemikaalit syanidia lukuunottamatta lisätään jauhatusvaiheessa myllyjen pumppukaivoihin, jotta niillä on riittävästi aikaa reagoida mineraalien kanssa. [16]

Lisättävien vaahdotuskemikaalien lisäksi yksittäisen vaahdotuskennon mineraalilisaantia voidaan ohjata säätämällä kennoon johdettavan ilman määrää sekä kennon pinnankorkeutta. Ilmamäärän kasvaessa kuplia muodostuu aiempaa enemmän, jolloin niin hyöty- kuin muidenkin mineraalien saanti kasvaa, ja pinnankorkeutta säätämällä voidaan puolestaan vaihdella vaahtopatjan paksuutta. Koko rikastusprosessin ohjaus koostuu tyypillisesti ainakin kahdesta tasosta. Alimmalla tasolla ovat yksittäisten kennojen ilmamäärien ja pinnankorkeuksien säädöt, joiden ohjaus voidaan

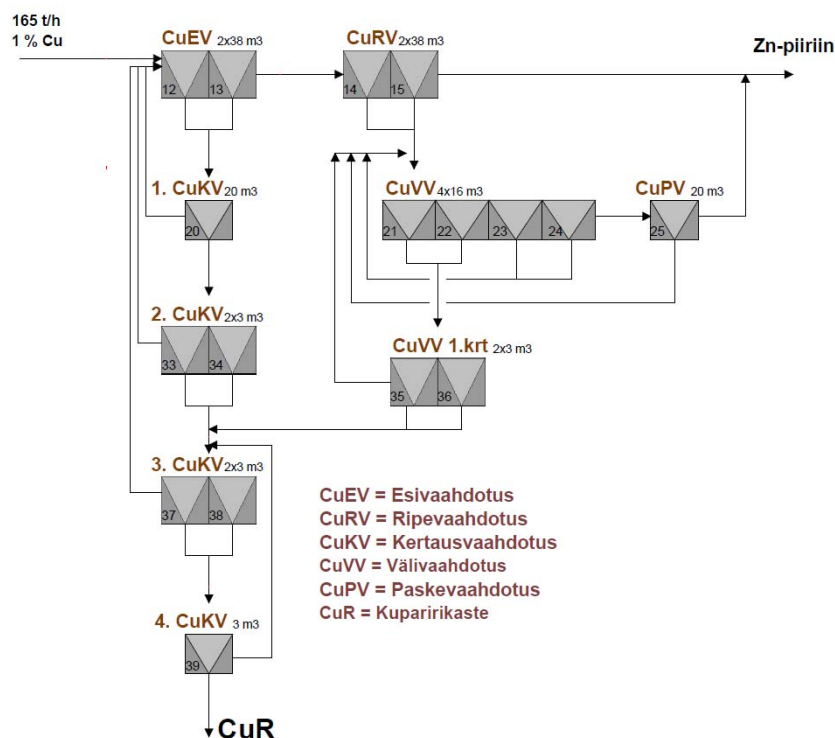
toteuttaa esimerkiksi ohjelmoitavalla logiikalla (PLC). Ylin ohjaustaso pyrkii optimoimaan koko prosessin kannalta tärkeitä tuotantoarvoja kuten rikasteen saantia ja pitoisuutta.

Pyhäsalmen rikastamolla on käytössä kolme kappaletta GE Fanuc 90-70 ohjelmoitavia logiikoita, jotka säätävät alimman tason ohjaimia ja keräävät prosessi-instrumenttien tuottamaa dataa. Nämä ala-asetat on kytketty Ethernet-verkon välityksellä tavallisessa PC-koneessa ajettavaan Cimplicity-palvelimeen. Cimplicity on nk. käytönohjaus- ja valvontajärjestelmä (SCADA) [18], joka toimii myös linkkinä koko ohjausjärjestelmän eri osien välillä. Cimplicityn kanssa samassa tietokoneessa toimii myös Outotecin kehittämä ylemmän tason asiantuntijasäätöjärjestelmä ACT (Advanced Control Tools). Tämä järjestelmä koostuu osittain sumeaa logiikkaan perustuvista päättelysäännöistä, joilla optimoidaan koko prosessin toimintaa. Cimplicity-ohjelmisto mahdollistaa lisäksi kommunikaation automaatiojärjestelmän ja prosessinäyttöjen, prosessitietokannan sekä muutamien erityisten mittauslaitteiden välillä. Järjestelmän rakenne sekä eri osien suhde toisiinsa on nähtävissä kuvassa 9.



Kuva 9: Pyhäsalmen rikastamon ohjausjärjestelmän rakenne. [16]

Kuparivaahdotus Pyhäsalmissä on jaettu useaan vaiheeseen (ks. kaavio kuvassa 10), mikä parantaa sekä kuparin saantia että rikasteen laatua. Prosessin alussa on kaksi esivaahdotuskennoa, joista rikaste johdetaan kertausvaahdotukseen ja jäte ri-pevaahdotukseen. Ri-pevaahdotuksen tarkoituksena on saada talteen esirikasteessa jätteesen joutuneet kupariripheet johtamalla ri-pevaahdotuksen rikaste 4-kennoiseen väli-vaahdotukseen, jonka rikaste puolestaan johdetaan väli-vaahdotuksen kertaus-seen. Tämän rikaste menee kertausvaahdotukseen ja jäte uudelleen väli-vaahdotukseen. Väli-vaahdotuksen jäte ohjataan paskevaahdotukseen, jonka jäte muodostaa yhdessä ri-pevaahdotuksen jätteen kanssa koko kuparipiirin jätteen, joka johdetaan sinkin vaahdotuspiiriin. Lopullinen rikaste saadaan viimeisen kertausvaahdotuksen rikasteena. [16]

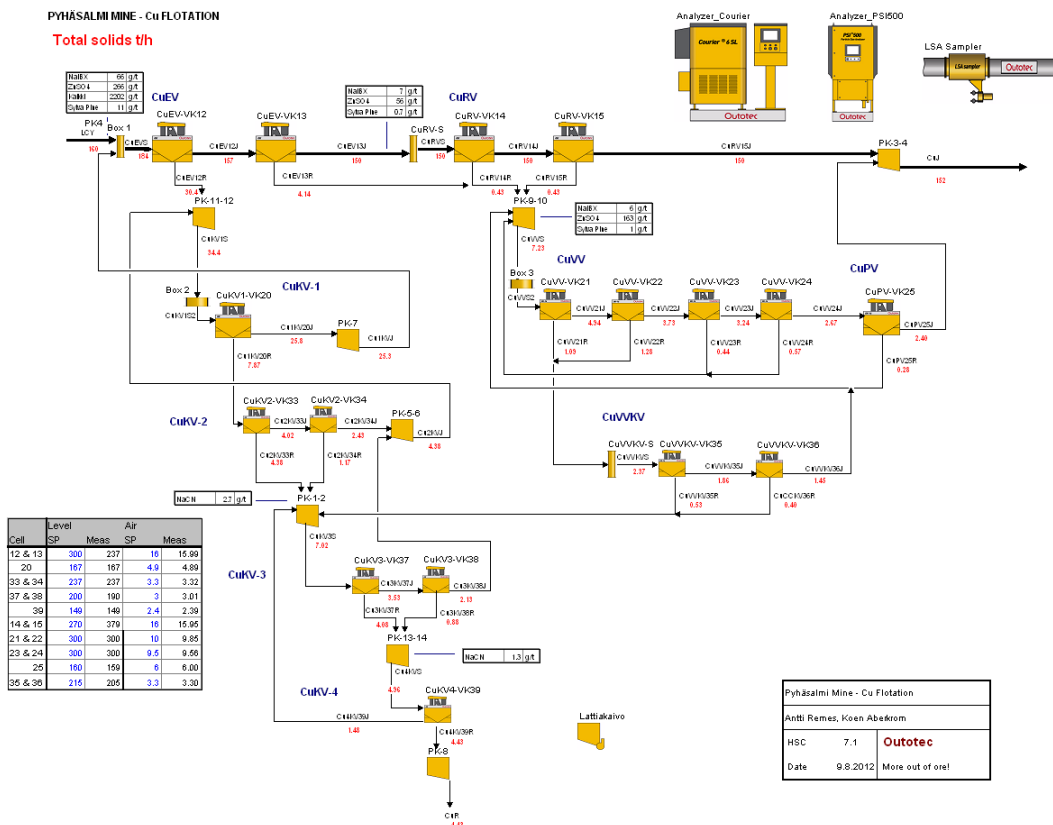


Kuva 10: Pyhäsalmen kaivoksen rikastamon kuparivaahdotuspiirin kaaviokuva. Vaahdotusprosessi on jaettu useaan vaiheeseen. Kuparirikaste (merkitty kuvassa lyhenteellä CuR) saadaan viimeisen kertausvaahdotuksen tuotteena. [16]

3.1 HSC Chemistry

Outotecin HSC Chemistry on kaupallinen ohjelmistotuote, jonka sovellusalue on huomattavasti pelkkää vaahdotusprosessin simulointia laajempi. Se soveltuu kuitenkin erinomaisesti myös tähän tarkoitukseen, sillä siinä on myös mahdollisuus dynaamiseen simulointiin tutkimuskäyttöä varten. Kuvassa 11 nähdään Pyhäsalmen kuparivaahdotusprosessi mallinnettuna Outotec HSC -ohjelmistolla.

Dynaaminen simulaatio asettaa uusia haasteita simulaation algoritmeille. Dynaamisessa vaahdotusprosessin simulaatiossa ei voida olettaa [14], toisin kuin staattisessa simulaatiossa, että kaikki syöte jakautuu täsmälleen rikasteeseen ja jätteeseen yhdessä vaahdotuskennossa. Kun aikaa kuluu tarpeeksi, näin varmasti käy, jolloin staattisessa simulaatiossa oletus on validi, mutta dynaamisessa simulaatiossa täytyy ottaa huomioon kennoa edeltävät prosessin vaiheet ja toisaalta myös kennon sisäinen dynamiikka. Tämän vuoksi staattista simulaatiota varten kehitettyjä yhtälöitä joudutaan muokkaamaan, jotta dynaamisesta simulaatiosta tulee tarkka.



Kuva 11: Pyhäsalmen kaivoksen rikastamon kuparipiiri mallinnettuna HSC-ohjelmistossa.

Outotec HSC:n dynaamisen simulaation kulku voidaan periaatteessa jakaa kymmeneen vaiheeseen [14], jotka on listattu alla.

1. Lasketaan kennoon tuleva syöte.
2. Sekoitetaan se täydellisesti kennon sisältämään lietteeseen.
3. Lasketaan jokaisen partikkelityypin true flotation -ilmiön perusteella vaahtoon siirtyvä massa.
4. Lasketaan jokaisen partikkelityypin kennon sisältämä massa.
5. Lasketaan jokaisen partikkelityypin entrainment-ilmiön perusteella vaahtoon siirtyvä massa.
6. Lasketaan jokaisen partikkelityypin vaahdon mukana rikasteeseen siirtyvä massa, ja drainage -ilmiön mukaan vaahdosta takaisin lietteeseen siirtyvä massa.
7. Lasketaan tai päivitetään kennon sisältö.

8. Lasketaan jokaisen partikkelityypin poistiventtiilin kautta jätteeseen siirtyvä massa.
9. Lasketaan kennon sisältämän massan tilavuus ja lietteen pinnankorkeus.
10. Lasketaan poistiventtiilin uusi ohjausarvo edellä laskettuun pinnankorkeuteen perustuen.

Käytännössä simulaatiossa tehdään kuitenkin yksinkertaistuksia siten, että oletetaan aika-askel lyhyeksi. Tällöin syötteen määrä on hyvin pieni verrattuna kennon sisältämän lietteen tilavuuteen, ja kohdat 4 ja 7 voidaan jättää huomiotta, sillä muutos näissä on äärimmäisen pieni. [14]

Tässä on huomattavaa oletus, jonka mukaan aika-askeleen täytyy olla lyhyt. Adaptiivisen simulaation ja erityisesti ohjausmuutosten ennusteiden laskemisen kannalta tällä saattaa olla mielenkiintoisia vaikutuksia. Jotta ohjausmuutoksille voidaan laskea ennusteita järkevässä ajassa, simulaatiota täytyy nopeuttaa, ja ainoa järkevä tapa nopeuttaa simulaatiota riittävän paljon on kasvattaa aika-askelta. Herää siis kysymys, onko 10 sekunnin aika-askel vielä pieni. Entäpä 30 sekunnin aika-askel?

Jotta simulaation toiminnasta voitaisiin saada hieman parempi kuva, esitetään simulaattorin laskennassa käyttämät perusyhtälöt. Saanti R voidaan laskea käyttäen modifioitua ensimmäisen kertaluvun kineettistä yhtälöä [14] [12]:

$$R = \frac{k_c \tau R_f (1 - R_w) + E R_w}{(1 + (k_c \tau R_f))(1 - R_w) + E R_w}, \quad (8)$$

missä k_c on kyseisen partikkelin vaahdottuvuuskerroin, τ on partikkelin viipymäaika, R_f on saanti vaahdosta, E on entrainment-kerroin ja R_w on veden saanti. Edellä kaikki saannit on yhdistetty, mutta koska dynaamisessa simulaatiossa saannit lasketaan joka aika-askeleella päivittyvän kennon sisällön eikä syötteen suhteen, ne voidaan myös laskea erikseen. Tällöin true-flotation -saanti (R_T) on yhden aika-askeleen τ_{step} aikana [14]:

$$R_T = \frac{k_c \tau_{step}}{1 + k_c \tau_{step}}, \quad (9)$$

missä k_c on edelleen vaahdottuvuuskerroin. Tämä voidaan edelleen laskea käyttäen hyväksi partikkelin vaahdottuvuutta P ja kuplien pinta-alavuota (*bubble surface area flux*) S_b :

$$k_c = P S_b. \quad (10)$$

Käytännössä kuplien pinta-alavuota voidaan selvittää kokeellisesti tietyllä vaahdotusprosessilla ja -kennolla tapauskohtaisesti.

Entrainment-saanti R_E lasketaan suoraan tiettynä osana veden saannista R_w [14]:

$$R_E = E R_w. \quad (11)$$

Entrainment-kertoimen E suuruuteen vaikuttaa ensisijaisesti raekoko X , ja se voidaan laskea kaavalla, joka hyödyntää entrainment-parametria ξ , joka vastaa sitä raekokoa, jota siirtyy veden mukana 20 % vaahtoon:

$$E = 2/(e^{2.292(X/\xi)^a} + e^{-2.292(X/\xi)^a}), \quad (12)$$

missä a on viritysparametri, jolle voidaan myös laskea arvo entrainment-parametrin, raekoon ja nk. drainage-parametrin avulla. Veden saanti lasketaan kaavalla [14]:

$$R_w = a\tau_f^b 100, \quad (13)$$

missä τ_f on ilman viipymäaika vaahtossa ja a ja b ovat kokeellisesti selvitettäviä prosessi- ja kennokohtaisia malliparametreja.

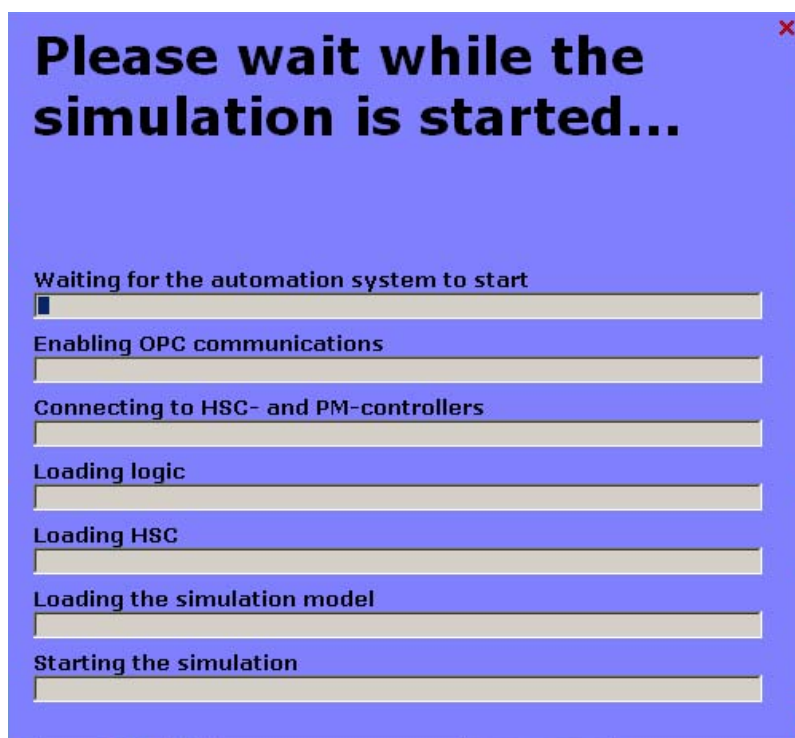
Saanti vaahtosta R_f voidaan laskea kaavalla [14]:

$$R_f = \frac{1 - h_f}{h_{k0}} \quad (14)$$

missä h_f on vaahtopatjan paksuus ja h_{k0} on vaahtopatjan paksuuden yläraja, jossa saanti painuu nollaan.

Yksittäisen kennon toimintaa voidaan siis simuloida ylläolevien yhtälöiden avulla. Käytännössä simulaatio koostuu useista kennoista ja muista osista, ja HSC Sim sisältääkin erittäin suuren määrän valmiiksi mallinettuja prosessin rakenneosasia, kuten kennoja, pumppuja ynnä muita, joiden parametreja voidaan tarvittaessa muokata. Vaahdotusprosessin simulaatio voidaan siis rakentaa erillisistä kennoista, jotka yhdistetään halutulla tavalla (vrt. kuva 11). Kun vielä huolehditaan siitä, että simulaation syöte on mineraalipitoisuuksiltaan ja raekokojakauman puolesta oikeanlainen, simulaatio voidaan käynnistää.

4 Adaptoituvan simulaatio-ohjelmiston rakenne



Kuva 12: Simulaatiojärjestelmän käynnistysruutu.

Vaahdotusprosessin simulaatioympäristö on rakennettu Windows XP -virtuaalikoneeseen ja se koostuu useista osajärjestelmistä. Ideana on ollut luoda mahdollisimman tarkasti oikeaa prosessia vastaava järjestelmä, joten simulaatiossa hyödynnetään osin samoja komponentteja kuin tuotantoympäristössä. Kuvassa 12 näkyy simulaatioympäristön aloitusruutu, josta voidaan seurata ohjelman eri komponenttien käynnistymistä.

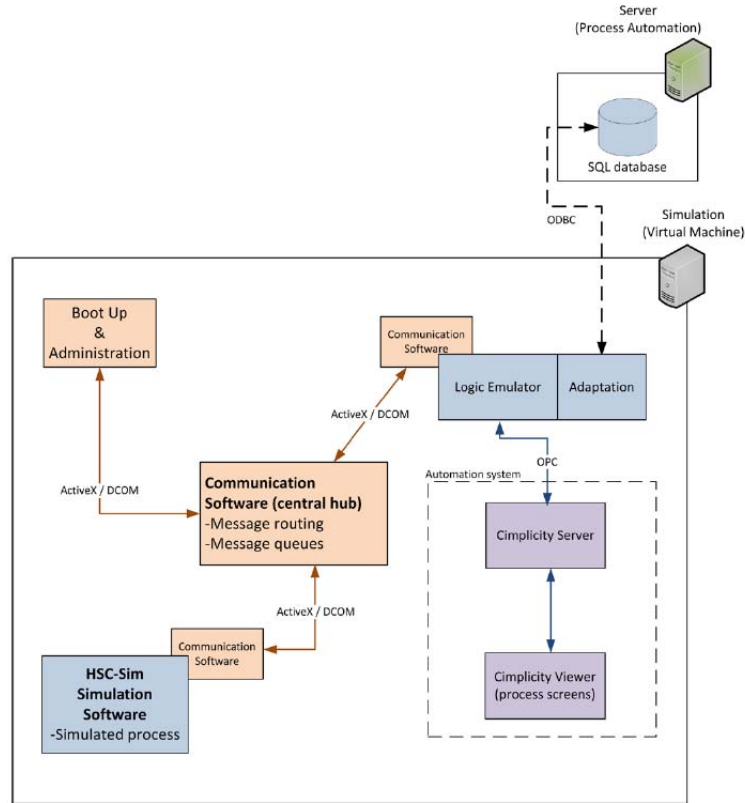
Varsinaista vaahdotusprosessia simuloidaan Outotecin HSC-ohjelmistolla, joka soveltuu hyvin tähän tarkoitukseen, koska se kykenee vaahdotusprosessin dynaamiseen simulointiin. Pyhäsalmen kaivoksessa vaahdotuksen alimman tason ohjauksesta vastaa GE Fanuc 90-70 ohjelmoitava logiikkajärjestelmä, jonka tehtävää simulaatiossa hoitaa Matlab-ohjelmalla toteutettu logiikkajärjestelmän emulaatio. Käytössä on lisäksi täysin samanlainen automaatio-ohjelmisto (Cimplicity) kuin Pyhäsalmen kaivoksen rikastamossa, ja kaivoksen automaatiotietokanta on kopioitu käytettäväksi simulaatiossa. Cimplicity-ohjelmistoon kuuluu myös automaationäyttö, josta voidaan seurata simuloidun prosessin tilaa. Eri osien väliseen kommunikaatioon on rakennettu oma järjestelmänsä, joka välittää tarpeellisen informaation näiden välillä. Adaptointialgoritmi on implementoitu Matlab-ohjelmistolla toimivan logiikkaemulaation yhteyteen. Adaptointijärjestelmällä on lisäksi yhteys Pyhäsalmen SQL-tietokantaan, joka toimii Open Database Connectivity -protokollan (ODBC) yli. Komponenttien kommunikaatiota sekä suhdetta toisiinsa havainnollistetaan kuvassa 13.

Adaptoitaviksi parametreiksi simulaatiossa on valittu kuparikiisun ja pyriitin vaahdotuskertoimet. Valinta perustuu osin Reinsalon [5] diplomityön tuloksiin ja osittain omiin havaintoihin siitä, kuinka simulaattorin vaahdotuskertoimet ja prosessin vasteet, kuten kuparin saanti ja rikasteen kuparipitoisuus, käytännössä suhtautuvat toisiinsa. Apuna on käytetty askelvastekokeita (ks. liite A), joiden avulla voidaan tarkastella mahdollisia ristikkäisvaikutuksia, joita tietysti pyritään välttämään. Askelvastekokeiden perusteella voidaan todeta, että kuparikiisun vaahdotuskerroin vaikuttaa vahvasti kuparin saantiin ja jonkin verran myös rikasteen kuparipitoisuuteen. Pyriitillä ei ole käytännössä havaittavaa vaikutus kuparin saantiin, mutta sillä on selvä vaikutus rikasteen kuparipitoisuuteen, joten nämä parametrit voidaan selvästi valita simulaattorin adaptoinnin viritysparametreiksi. Tällöin kuparin saanti viritetään kalkopyriitin avulla samalle tasolle todellisen prosessin kanssa ja pyriitin avulla korjataan pienet poikkeamat rikasteen pitoisuudessa.

Ilmeinen arvaus sopivaksi parametriksi rikasteen pitoisuuden tason säätämiseen simulaattorissa olisi sivukiven vaahdottuvuus, sillä tällä ei ole, eikä pitäisikään olla, vaikutusta kuparin saantiin. Sen pitäisi periaatteessa kuitenkin vaikuttaa rikasteen kuparipitoisuuteen, sillä mitä enemmän rikasteeseen nousee sivukiveä, sen pienemmäksi kuparin suhteellinen osuus rikasteessa muuttuu. Valitettavasti käytännössä voidaan huomata, että sivukiven vaahdottuvuuskertoimen huomattavallakaan muutoksella ei ole simulaatiossa minkäänlaista vaikutusta rikasteen kuparipitoisuuteen. Tämä on pieni ongelma simulaattorissa eikä sen syistä ole toistaiseksi päästy selville. Samaan ideaan perustuu kuitenkin myös ohjaussuureeksi valitun pyriitin vaahdotuskertoimen vaikutus, eli ajan kuluessa kuparia nousee käytännössä saman verran kuin muutenkin, mutta koska rikasteeseen nousevan pyriitin määrä vaihtuu, rikasteen kuparipitoisuus muuttuu sen mukaisesti.

Vaahdotuskertoimet ovat laskennallisia suureita, jotka kuvaavat eri mineraalien rakeiden alttiutta nousta vaahdotuskennon rikasteeseen. Usein kunkin lietteessä olevan mineraalin partikkelit jaetaan vielä tarkemmin hitaasti, nopeasti ja ei-vaahdottuviin (*slow floating*, *fast floating* ja *non-floating*) kategorioihin. Näin tehdään myös HSC Chemistry -ohjelmassa, mutta adaptoituvassa simulaattorissa näiden keskinäiset suhteet on asetettu vakioiksi. Tällöin jokaisen mineraalin vaahdotuvuutta voidaan virittää yhden vaahdotuskertoimen avulla, mikä helpottaa parametrien adaptointia.

Alkuperäisen suunnitelman mukaan adaptoituvan simulaattorin olisi haluttu otavan huomioon myös muutokset prosessin kokonaissyötössä. Pyhäsalmeilla ei kuitenkaan ole tällä hetkellä käytössä sellaista mittausta, josta tämän voisi riittävässä tarkkuudella laskea. Murskainten ja jauhatuspiirin välisten hihnavaakojen avulla voidaan saada tieto niiden päällä kulkevan kiviaineksen kokonaismassasta, mutta jauhinylläyt tasaavat tätä massavirtaa huomattavasti, eivätkä hihnavaakojen mitaukset lopulta kuvaa lainkaan käyttökelpoisella tavalla vaahdotusprosessin syötön tonnimäärää. Tämän lisäksi Pyhäsalmen henkilökunnan arvio vaahdotusprosessin kokonaissyötön muutoksista on, että ne ovat hyvin pieniä, ja syöttö on käytännössä lähes vakio. Näiden syiden vuoksi simulaatiossa käytetään kokonaissyötön osalta vakioarvoa. Syötön tonnimäärää voidaan toki muuttaa manuaalisesti, mutta yleensä se pidetään välillä 160 - 165 t/h. Suuret ja äkkiäiset muutokset kokonaissyötössä



Kuva 13: Simulaatiojärjestelmän komponentit ja niiden suhde toisiinsa [15] (muokattu).

aiheuttavat myös erityisiä vaikeuksia vaahdotuskennojen pinnankorkeuden säätöpiireille ja saattavat ajaa koko simulaation epästabiiliksi.

Vaikka hihnavaakojen mittaustietoja ei tällä hetkellä käytetä simulaattorissa, ne haetaan silti Pyhäsalmen tietokannasta noin 25 sekunnin välein. Tietokannan arvot päivittyvät noin minuutin välein ja monet mittaukset päivitetään paljon harvemmin, jolloin aikaväli uusien mittaustulosten välillä saattaa olla jopa 10 - 20 minuuttia. Hihnavaakojen mittausten lisäksi tietokannasta haetaan muiden muassa kuparin saanti rikasteeseen sekä rikasteen ja jätteen kuparipitoisuudet. Mikäli simulaatiossa tarvitaan kuparin saantia jätteeseen, se saadaan yksinkertaisella vähennyslaskulla:

$$R_{CuJ} = 100 - R_{CuR}, \quad (15)$$

missä R_{CuJ} ja R_{CuR} ovat kuparin saannit jätteeseen ja rikasteeseen. Jokaiseen mittaukseen liitetään tietokannassa aikaleima, joka haetaan aina, kun muitakin tietoja haetaan tietokannasta. Näin voidaan nähdä, onko kyseessä uusi mittaus, vai onko tietokannan uusin arvo edelleen samasta mittauksesta kuin edellinen haettu arvo.

Syötteen mineraalipitoisuudet ovat myös tärkeitä simulaation onnistumisen kannalta. Ei voida olettaa, että simulaatiojärjestelmä pystyisi ainakaan kovin pitkään selittämään todellisen prosessin vaihteluja ilman tietoa prosessin syötteestä. Näiden

lisäksi tietokannasta haetaan tiettyjen ohjausten arvot, jotta voitaisiin päästä lähemmäs ideaalitulannetta, jossa adaptointiparametrit vain säätävät vasteiden yleistä tasoa tai virittävät simulaattorin jollekin toiminta-alueelle, ja allaoleva simulaattori selittää muut muutokset.

Tietokannasta haetaan neljä syötteen pitoisuusmittausta: kuparin, sinkin, lyijyn ja rikin pitoisuudet, jotka syötetään sellaisenaan simulaattorin syötteen pitoisuuksiksi. Ohjausarvoista mukana ovat kennojen pinnankorkeuksien ja ilmamäärien asetusarvot. Selvyyden vuoksi kaikki tietokannasta haettavat tiedot on koottu taulukkoon 1. Taulukossa esiintyvät lyhenteet tarkoittavat kuparin (CU) vaahdotuspiirin eri osia: EV - esivaahdotus, VV - väliavaahdotus, KV - kertausvaahdotus, RV - ripevaahdotus ja PV - paskevaahdotus.

Mineraalien raekoko vaikuttaa vaahdotusprosessin onnistumiseen, joten tästä tarvitaan niinikään ajantasainen tieto tai vähintään valistunut veikkaus, jotta simulaation tulokset saadaan tarkoiksi. Raekokomittausta ei kuitenkaan saada toistaiseksi tietokannasta, koska raekokoanalyysaattori ei tällä hetkellä ole toiminnassa, joten simulaatioissa käytetään vuoden 2012 kuukausiseuloista saatua painotettua jakaumaa, joka näkyy taulukossa 2.

Simulaattorin adaptointialgoritmiksi on valittu PI-säädin [20]. Valinta perustuu jälleen osin Reinsalon diplomityötään [5] varten tekemään työhön, ja toisaalta omiin havaintoihin. Reinsalon tutkima pienimmän neliösumman algoritmi, tai tarkemmin jokin sen modifikaatioista, olisi varmasti soveltunut tähän myös, mutta PI-säätimeen on päädytty kolmesta selkeästä syystä. PI-säädin on kaikille vähänkään säätötekniikkaan tutustuneille hyvin tuttu säätöalgoritmi, ja se on yksinkertainen sekä helppo toteuttaa. PI-säätimen suorituskyky tässä nimenomaisessa ongelmassa on osoittautunut vähintään yhtä hyväksi kuin yksikään MLS-algoritmin variaatio, ja sen viritys on huomattavasti helpompaa kuin MLS-algoritmin variaatioiden tapauksessa.

Tässä työssä adaptoituvan simulaattorin viritykseen on käytetty yritys-erehdys-menetelmää, mutta myös jokin viritysalgoritmi, kuten Ziegler-Nicholsin menetelmä [20], olisi voinut tarvittaessa tulla kysymykseen. Suurimman haasteen PI-säätimen viritykselle tässä tapauksessa asettaa vaahdotusprosessin hitaus, mikä käytännössä tekee virityksestä erittäin aikaavievän tehtävän. PI-säätimen viritys on kuitenkin hitaudesta huolimatta kohtuullisen suoraviivainen prosessi etenkin ristikkäisvaikutusten ollessa vähäisiä.

PI-säädin voidaan muodostaa jatkuvalla prosessille seuraavalla tavalla [20]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (16)$$

missä $u(t)$ on prosessin ohjauksen arvo ajanhetkellä t , ja K_p sekä K_i ovat PI-säätimen viritysparametrit. Erosuure $e(t)$ lasketaan simulaation ja todellisen prosessin vasteen erotuksesta, kuten esimerkiksi kuparin saannin erosuure $e_{R_{cu}}(t)$:

$$e_{R_{cu}}(t) = R_{cu}^{prosessi}(t) - R_{cu}^{simulaatio}(t), \quad (17)$$

missä $R_{cu}^{prosessi}$ ja $R_{cu}^{simulaatio}$ ovat prosessin ja simulaation kuparin saannit rikasteeseen. PI-säätimen diskreetointi johtaa muotoon [21]:

Taulukko 1: Kaikki tietokannasta haettavat mittaukset, niiden yksiköt ja tyypillinen tietokannasta haettu esimerkkiarvo, joka antaa jonkinlaisen kuvan kyseisestä mittauksesta. On huomattavaa, että kuparin saanti rikasteeseen ei itse asiassa ole mittaus vaan laskennallinen suure.

Tietokannasta haettava tieto	yksikkö	tyypillinen mittausarvo
Kuparin pitoisuus (rikaste)	%	31,62
Kuparin saanti (rikaste)	%	95,52
Kuparin pitoisuus (jäte)	%	0,06
Kuparin pitoisuus (syöte)	%	0,90
Sinkin pitoisuus (syöte)	%	2,19
Lyijyn pitoisuus (syöte)	%	0,02
Rikin pitoisuus (syöte)	%	43,16
Kokonaissyöttö (hihnavaaka)	t/h	161,12
Aikaleima	–	2013-07-04 14:25:27
CUEV ilmanvirtaus (ohjaus)	m ³ /min	17,40
CUEV pinnankorkeus (ohjaus)	mm	290
CURV ilmanvirtaus (ohjaus)	m ³ /min	21,25
CURV pinnankorkeus (ohjaus)	mm	270
CUVVEV VK21-22 ilmanvirtaus (ohjaus)	m ³ /min	10,35
CUVVEV VK23-24 ilmanvirtaus (ohjaus)	m ³ /min	3,00
CUVVEV pinnankorkeus (ohjaus)	mm	310
CUPV ilmanvirtaus (ohjaus)	m ³ /min	2,50
CUPV pinnankorkeus (ohjaus)	mm	300
TC20 ilmanvirtaus (ohjaus)	m ³ /min	5,40
TC20 pinnankorkeus (ohjaus)	mm	190
CUKV I ilmanvirtaus (ohjaus)	m ³ /min	5,11
CUKV I pinnankorkeus (ohjaus)	mm	232
CUKV II ilmanvirtaus (ohjaus)	m ³ /min	3,55
CUKV II pinnankorkeus (ohjaus)	mm	273
CUKV III pinnankorkeus (ohjaus)	mm	108
CUKV IV ilmanvirtaus (ohjaus)	m ³ /min	2,14
CUKV IV pinnankorkeus (ohjaus)	mm	249

$$u(k+1) = u(k) + K_p \left(\left(1 + \frac{\Delta t}{K_i} \right) e(k) - e(k-1) \right), \quad (18)$$

missä Δt on aika-askeleen pituus ja k on diskretoitu ajanhetki. K_p ja K_i ovat kertoimia, $u(k)$ on laskettu ohjaus ja $e(k)$ on erosuureen arvo ajanhetkellä k .

Adaptointijärjestelmän toiminta voidaan jakaa kuuteen osaan. 1) Tarkistetaan, onko kulunut riittävä aika, eli riittävän monta kierrosta, edellisestä tietokantahausta, ja suoritetaan haku, mikäli tämä on tarpeellista. 2) Päivitetään vaahdotusker-toimia lukuunottamatta kaikki datapuskurit, joissa säilytetään tieto tietokannasta

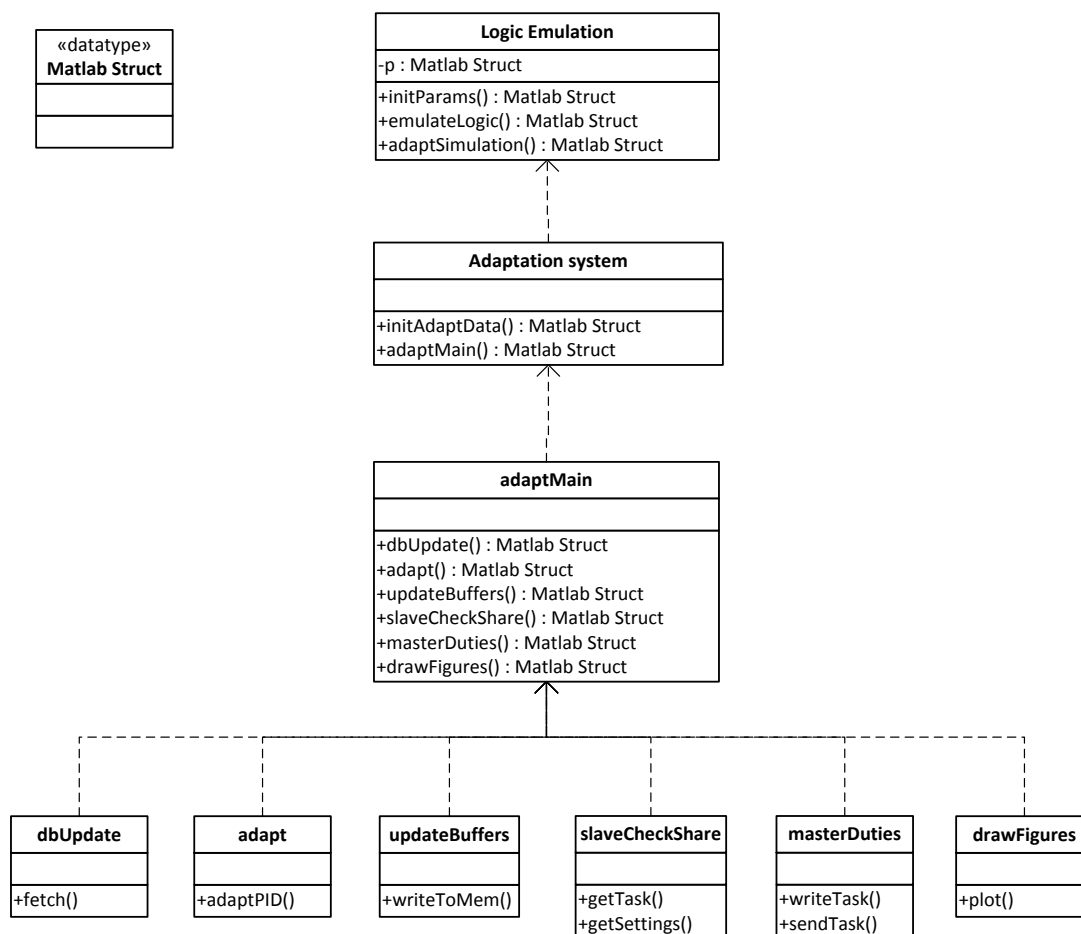
Taulukko 2: Vuoden 2012 malmin kuukausiseuloista laskettu syöttöpainotettu raekokojakauma, jota käytetään toistaiseksi simulaation raekokojen määrittelyssä. [17]

kokoluokka (μm)	osuus (%)
alle 37	42,9
37 – 74	23,9
74 – 105	16,6
105 – 149	11,1
149 – 210	3,6
yli 210	1,8

haetuista suureista sekä simulaation seurannan ja adaptoinnin kannalta olennaisista suureista viimeisen 20 000 aika-askeleen ajalta. 3) Lasketaan uudet vaahdotuskertoimet edellä selvitetyn adaptointialgoritmin avulla käyttäen viimeisimpiä arvoja datapuskurissa. 4) Päivitetään vaahdotuskertoimien arvot datapuskuriin. 5) Piirretään tai päivitetään kuvaajat, jotka on valittu piirrettäväksi asetustiedostossa. 6) Mikäli datapuskuri on täynnä, kirjoitetaan kaikkien puskurien sisältämä data tiedostoon, ja määritetään, että puskurin seuraava vapaa alkio on sen ensimmäinen alkio, eli periaatteessa "tyhjennetään" puskuri.

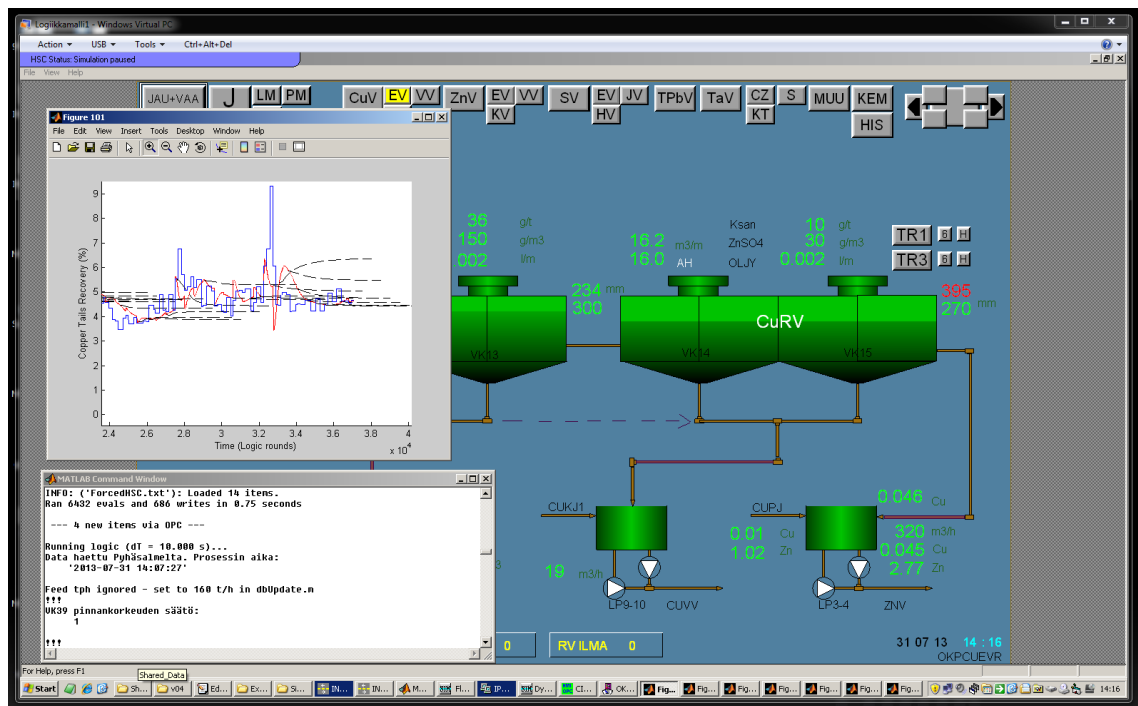
Dataa kerätään puskuriin, jotta voidaan tallettaa kerralla suuri määrä dataa tiedostoon, eikä levyllä tarvitse kirjoittaa jokaisen simulaatioaskeleen jälkeen. Levyllä talletetaan tiedot syötteen pitoisuudesta, vaahdotuskertoimista (eli adaptoinnin ohjausparametreista) ja simulaattorin sekä vaahdotusprosessin vasteet kuparin saaneista ja pitoisuuksista jätteessä ja rikasteessa viimeisten 20 000 aika-askeleen ajalta. Myös kuvaajia päivitetään vain 20 aika-askeleen välein, ja vaikka se ei ehkä ole kovinkaan suuri kevennys simulaattorin koneelle asettamaan taakkaan, niin toisaalta tyypillisesti yhdessä tietokoneessa ajetaan neljää virtuaalikonetta, joissa kaikissa on käytössä sama simulaatio-ohjelmisto, jolloin tällä voi jo olla pientä merkitystä. Toinen syy tähän on se, että simulaattorin saannin vaste sisältää paljon kohinaa, ja sitä keskiarvoistetaan käyttämällä juurikin viimeisten 20 askeleen arvoja.

Adaptointi on rakenteellisesti logiikkaemulaation aliohjelma, joka koostuu itsessään useasta aliohjelmasta. Jokaisella simulointikierroksella logiikkaemulaatio kutsuu aliohjelmia *adaptMain*, joka sisältää kaiken simulaation adaptointiin liittyvän toiminallisuuden. Ohjelman tarvitsemia määrittelyjä tehdään simulaatioympäristön alustusohjelmassa *initParams*, ja tämän aliohjelmassa *initAdaptData*. Kukin aiemmin mainituista kuudesta adaptointijärjestelmän toimintavaiheesta datan tallennusta eli vaihetta 6) lukuunottamatta toteutetaan omassa aliohjelmassaan. Tämä ratkaisu selkeyttää ohjelman rakennetta ja parantaa koodin luettavuutta. Vaihe 1) suoritetaan aliohjelmassa *dbUpdate*, ja vaiheet 2) ja 4) suoritetaan aliohjelmassa *updateBuffers*. Adaptoinnin ydin eli vaihe 3) suoritetaan yksinkertaisesti nimetyssä aliohjelmassa *adapt* ja kuvaajien piirtäminen aliohjelmassa *drawFigures*. Ohjelman rakenne ja eri aliohjelmien suhde toisiinsa näkyvät kuvassa 14.



Kuva 14: Adaptointiohjelman rakenne.

Adaptoituva simulaattori sisältää myös mahdollisuuden laskea ennusteita tuleville ajanhetkille, jotta voitaisiin esimerkiksi arvioida mahdollisten ohjausmuutosten vaikutuksia prosessin vasteeseen. Adaptoituvan simulaattorin ennusteiden laskenta on toteutettu keskitettyä ohjausta eli nk. master-slave -arkkitehtuuria käyttäen [22]. Tämä tarkoittaa sitä, että yksi simulaattorin sisältävistä virtuaalikoneista on nk. master, joka ohjaa muiden koneiden toimintaa. Käyttäjä voi ohjata simulaattoria ja seurata simulaation etenemistä tältä master-koneelta, joka käyttää kolmea muuta simulaattorin sisältävää virtuaalikonetta simulaatioennusteiden laskemiseen. Alkutilanteessa käyttäjä käynnistää master-koneen ja kolme nk. slave-konetta, jotka jäävät odottamaan ohjeita. Virtuaalinen slave-kone saa master-koneelta tehtävän laskea annetusta alkutilanteesta tietyillä parametriarvoilla määrätyn pituisen ennusteen, minkä jälkeen se palauttaa laskennan tulokset, uudelleenkäynnistää simulaatioympäristön ja jää odottamaan uusia ohjeita. Master-kone piirtää ennusteen adaptoituvan simulaattorin ja prosessin vasteen kanssa samaan kuvaajaan, jolloin käyttäjä näkee, mihin suuntaan prosessin vasteen voidaan odottaa mahdollisesti muuttuvan lähitulevaisuudessa.

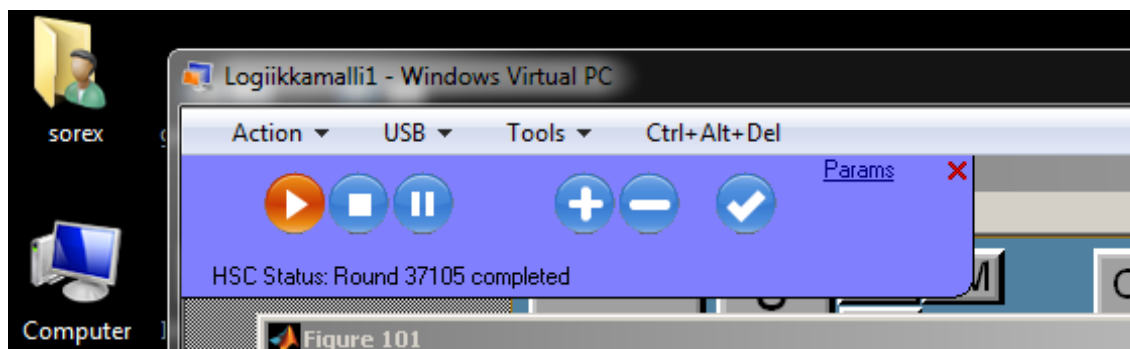


Kuva 15: Adaptoituvan simulaattorin toimintanäkymä.

Jotta ohjelma ei paisuisi liikaa ja sen rakenne pysyisi suhteellisen yksinkertaisena, kommunikaatio master- ja slave-koneiden välillä toteutetaan Windows-jakojen avulla. Tämä tarkoittaa sitä, että odottavat slave-koneet tarkistavat tietyin väliajoin, eli noin 30 sekunnin välein, onko kyseisen koneen jaettuun kansioon tullut tiedosto, joka sisältää uuden simulaatiotehtävän. Ennusteen valmistuttua slave-kone tallettaa datan tiedostoon ja siirtää tiedoston master-koneen jaettuun kansioon. Tässä on huomioitavaa, että jokaisen slave-koneen on tiedettävä master-koneen verkkojaon sijainti, ja toisaalta master-koneen on tiedettävä kaikkien slave-koneiden jakojen sijainnit. Näin jälkiviisaana voidaan toki sanoa, että olisi ollut ehkä järkevämpää antaa slave-koneiden tallentaa data omiin verkkojakoihinsa, joista master-kone olisi voinut ne sitten hakea. Tällöin vain master-koneen tarvitsisi tietää muiden sijainnit, ja slave-koneiden ei tarvitsisi tietää muita kuin oma verkkojakonsa.

Ohjelman käyttöliittymä on insinöörimäisen monimutkainen ja vähän karu, sillä siihen ei ole kiinnitetty projektin aikana kovinkaan paljon huomiota, mutta toisaalta käyttäjälle on tarjolla kaikki vähänkään olennainen tieto simulaation kulusta. Kuvassa 15 on tyypillinen käyttönäkymä, josta voidaan huomata, että käytännössä ohjelmisto koostuu useista osaohjelmista ja ikkunoista. Adaptoinnin kulkua ja ennusteita voidaan seurata Matlabin piirtoikkunoista, joista kuvassa on esillä kuparin saanti jätteeseen. Matlab-komentoikkunasta voidaan seurata ohjelman välitulosteita, kuten esimerkiksi kuvassa näkyy juuri huomautus siitä, että Pyhäsalmen tietokannasta on haettu viimeisimmät prosessiarvot. Taustalla näkyy automaatio-ohjelmiston HMI-ohjelma, josta voidaan myös seurata simuloidun järjestelmän toimintaa. Tämä näkymä on tutumpi todellisen prosessin kanssa työskenteleville henkilöille, koska

kyseessä on täsmälleen sama ohjelmisto kuin tehtaalla. Käyttäjä voi lisäksi seurata HSC-ohjelmiston simulaatiota toiminnassa, sillä tämäkin toimii omassa ikkunassaan aivan normaalisti ja antaa käyttäjän seurata simulaation eri osia. Ohjelmistoon kuuluu myös käyttöliittymäpaneeli, josta nähdään simuloitujen aika-askeleiden lukumäärä ja josta simulaatio voidaan pysäyttää, käynnistää uudelleen tai sammuttaa. Kun hiiren osoitin viedään tämän osan päälle, paneeli aukeaa, kuten kuvasta 16 nähdään. Koska adaptoituva simulaattori on rakennettu aiemmin toteutetun virtuaalisen simulaatioympäristön päälle, paneelissa on muitakin ominaisuuksia, kuten mahdollisuus tyhjentää tai täyttää tankit, tallentaa aikaleima ja muokata syötteen parametreja, joita ei kuitenkaan käytetä adaptoituvassa simulaattorissa.



Kuva 16: Adaptoituvan simulaattorin ohjauspaneeli.

5 Tulokset

Työn tavoitteena on ollut rakentaa adaptoituva simulaattori, joka pystyisi mahdollisimman hyvin seuraamaan oikeaa vaahdotusprosessia, ja joka pystyisi tämän hyvän approksimaation perusteella laatimaan ennusteen todellisen systeemin tilasta lähitulevaisuudessa. Kantava ajatus on, että simulaattoriympäristö olisi jo ilman adaptaatiota melko hyvä selittämään prosessin käyttäytymistä, mutta adaptoinnin avulla korjataan ne pienet puutteet mallin ja todellisuuden välillä, joita simulaatioon aina väistämättä jää. Edellisissä luvuissa on selitetty simulaattorin rakenne, joten nyt voidaan tarkastella simulaattorin suorituskykyä ja sillä saatuja koetuloksia.

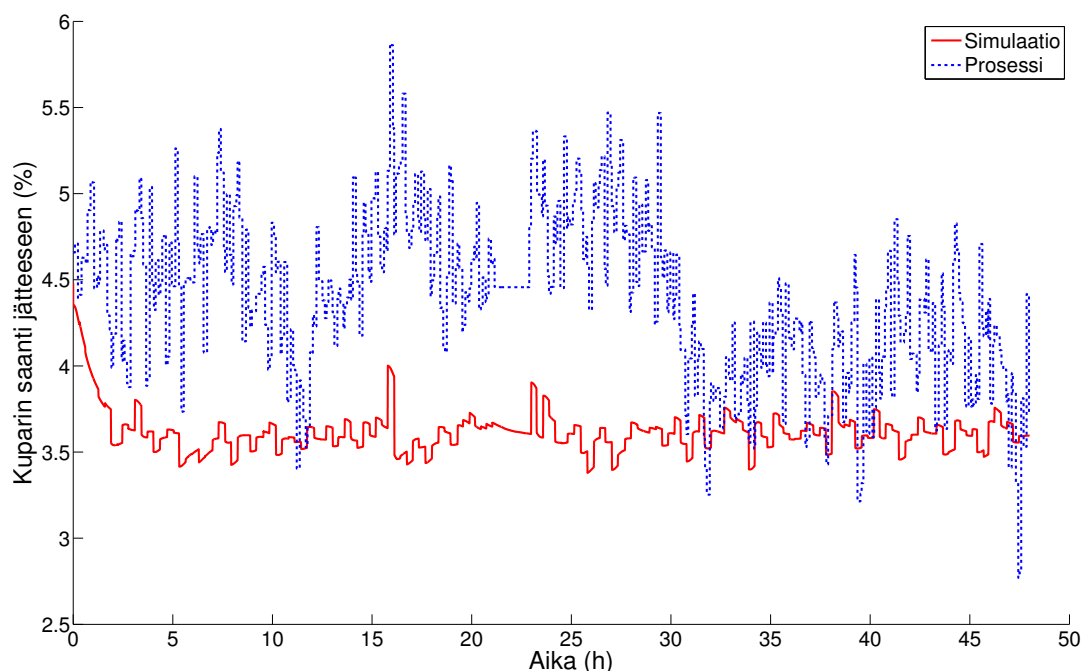
Käytännössä simulaattorin tarkkuutta ja suorituskykyä voidaan seurata vertaamalla kuparin saannin ja rikasteen kuparipitoisuutta simulaattorissa saantiin ja pitoisuuteen todellisessa prosessissa. Nämä ovat vaahdotusprosessin kannalta tärkeimmät suureet, joita seurataan tarkasti myös Pyhäsalmeella, sillä saanti on suorassa riippuvuussuhteessa kaivoksen tuottoon, ja rikasteen pitoisuus on tärkeää jatkojalostuksen onnistumisen kannalta. Todellisessa vaahdotusprosessissa seurataan muitakin vasteita, kuten vaikkapa sinkin saantia kuparirikasteeseen, sillä epäpuhtauksista voidaan tyypillisesti joutua maksamaan sopimussakkoja asiakkaalle. Muihin prosessin vasteisiin ei tässä työssä kuitenkaan kiinnitetä suurta huomiota.

Tässä luvussa käsitellään kaikkiaan 7 koetta. Ensimmäinen koe on yksinkertainen esimerkki simulaatiojärjestelmän toiminnasta ilman adaptointia. Toisessa kokeessa ajetaan adaptoituvaa simulaattoria todellisen prosessin rinnalla. Kolmannessa kokeessa selvitetään adaptoituvan simulaattorin soveltuvuutta jatkuvien ennusteiden laskentaan siten, että siinä adaptointi kytketään kesken kokeen pois käytöstä. Neljännessä kokeessa tehdään nk. jatkuvia ennusteita todelliselle prosessille. Viidennessä kokeessa tutkitaan ennusteiden laskentaa ihanteellisissa olosuhteissa häiriöiden minimoimiseksi. Kahdessa viimeisessä kokeessa ei enää lasketa varsinaisia ennusteita, vaan tutkitaan, pystyttäisiinkö simulaation tarkkuutta ja kykyä selittää prosessin muutoksia kasvattamaan lisäämällä simulaattoriin tiettyjä ominaisuuksia.

5.1 Simulaatio ilman adaptointia (koe 1)

Ensimmäisissä kuvissa nähdään simulaatioympäristön laskema kuparin saanti jätteeseen (kuva 17) sekä rikasteen kuparipitoisuus simulaatiossa (kuva 18) ilman adaptointia. Kuvissa 19 ja 20 näkyvät syötteen kuparin, sinkin ja rikin pitoisuudet simulaation ajalta. Vaahdotuskertoimet on pidetty simulaation ajan vakioarvoissa, jolloin pyrittiin vaahdotuskerroin on ollut 0,2 ja kalkopyriitin 0,4. Edellä mainittiin, että nimenomaan kuparin saanti rikasteeseen on olennaista, mutta koska kaikki kupari menee joko jätteeseen tai rikasteeseen, voidaan saanti rikasteeseen laskea vähentämällä saanti jätteeseen 100 prosentista, eikä näin ollen ole mitään väliä sillä kumpi saanti kuvaan on piirretty. Syy siihen, että tämän luvun kuvissa esiintyy pääasiassa saanti jätteeseen johtuu paikoitellen vakiintuneista käytännöistä, joiden mukaan vaahdotusprosessin toimintaa ohjataan jätesaannin avulla.

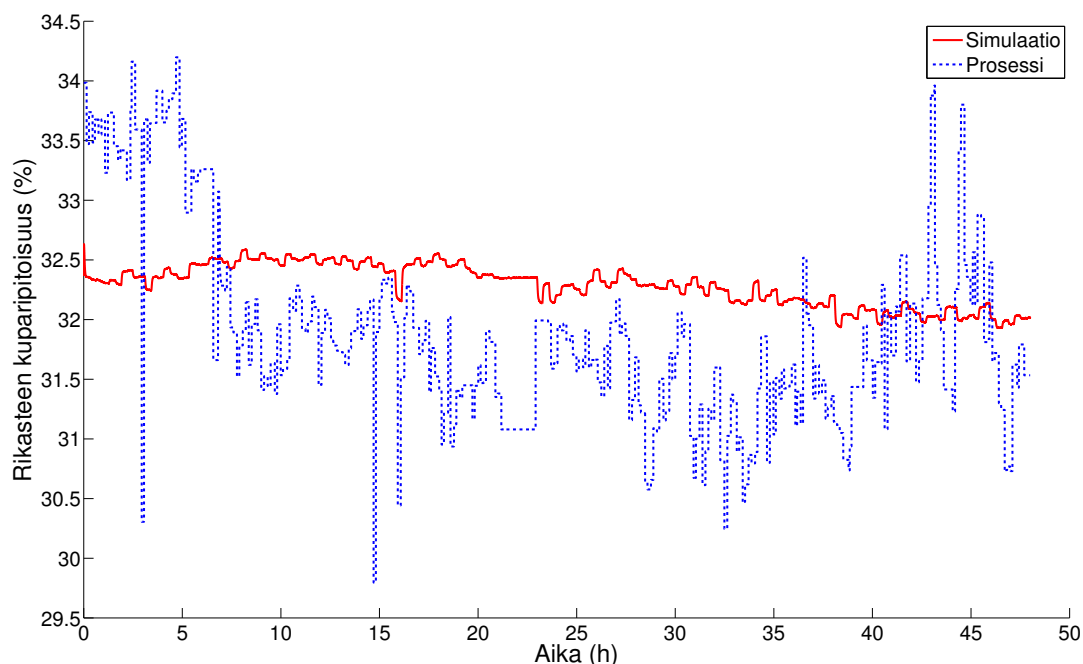
Simulaatiossa on käytetty 2 sekunnin aika-askelta, jolloin simulaation kulku vastaa melko hyvin reaaliaikaa, sillä yhden kokonaisen simulaatiokierron laskemiseen



Kuva 17: Kuparin saanti jätteeseen kokeessa 1. Simulaattorin ja todellisen prosessin vasteet, kun adaptointi ei ole käytössä. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin rikastamalla laskettu vaste sinisellä katkoviivalla. Saannista ei ole suoraa mittausta vaan se lasketaan rikastamalla pitoisuusmittauksiin perustuen.

kuluu juurikin noin 2 sekuntia. Jotta simulaation ja prosessin aikavakioista saataisiin jonkinlainen käsitys, lisättäköön vielä, että tällöin simulaatiossa 40000 aika-askelta vastaa noin yhtä vuorokautta. Vaahdotuskertoimien arvot pidetään vakiona, mutta niitä ei ole erityisesti kalibroitu tätä simulaatiota varten. Vaahdotuskertoimet vaikuttavat hyvin vahvasti tiettyjen vasteiden suuruuluokkaan, joten näiden avulla yksittäinen lyhyt simulaatio saataisiin niin haluttaessa helposti vaikuttamaan joko hyvin onnistuneelta tai erittäin epäonnistuneelta. Jos simulaatioympäristöä haluttaisiin käyttää ilman adaptointia, voitaisiin tehdä jonkinlainen analyysi vasteiden keskiarvoista, ja kalibroida vaahdotuskertoimet näiden keskiarvojen suhteen oikein, mutta tämän työn tavoitteena on nimenomaan adaptoituvan simulaattorin tutkiminen, minkä vuoksi näin ei tehdä.

Ilman adaptointia simulaattori pystyy ennustamaan ja selittämään joitain vaihtelevia vaahdotusprosessin vasteissa. Koska mukana on informaatio muutoksista syötön mineraalipitoisuuksissa kuparin, sinkin, lyijyn ja pyriitin osalta, monet pienet paikalliset muutokset (tai ehkäpä tarkemmin häiriöt) vasteissa näkyvät myös simulaattorissa. Esimerkiksi noin ajanhetkellä 15 h kaikissa kuvaajissa näkyy piikki, mikä johtuu suuresta poikkeamasta syötteen pitoisuuksissa tai hieman epäonnistuneesta syötteen pitoisuusmittauksesta rikastamalla. Näistä yksityiskohdista huolimatta, vasteessa on selvä pysyvä virhe, jonka syyt lienevät moninaisia, koska kaikkia oikeassa prosessissa tapahtuvia ilmiöitä ei mitenkään voida ottaa huomioon simulaatios-

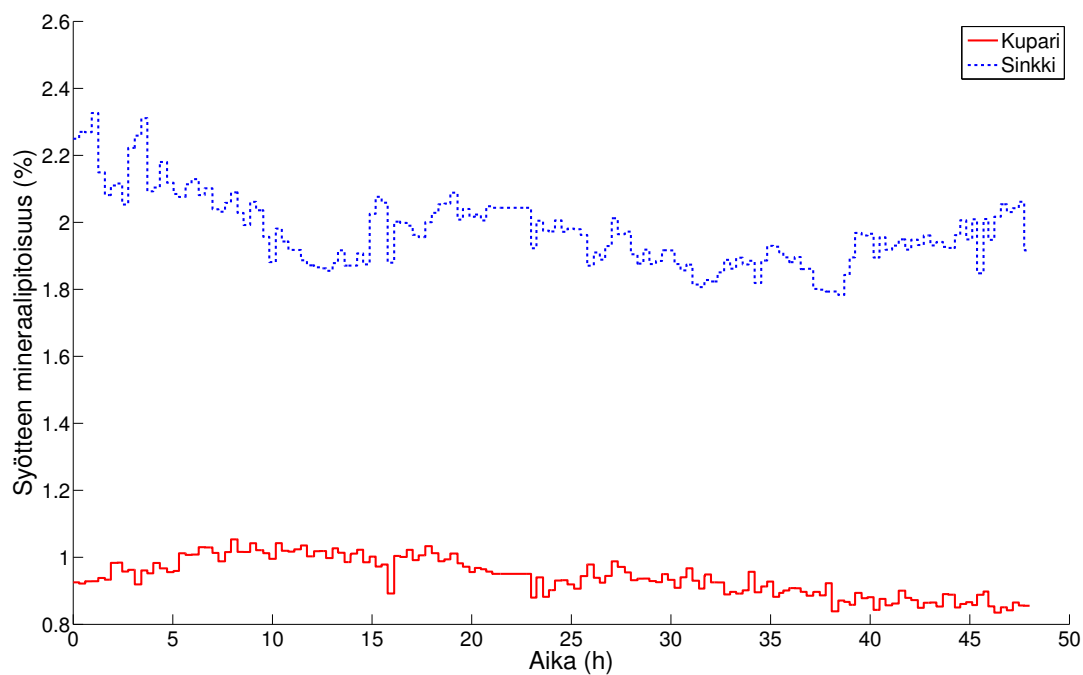


Kuva 18: Kuparirikasteen kuparipitoisuus kokeessa 1. Simulaattorin ja todellisen prosessin vasteet, kun adaptointi ei ole käytössä. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin laskettu vaste sinisellä katkoviivalla.

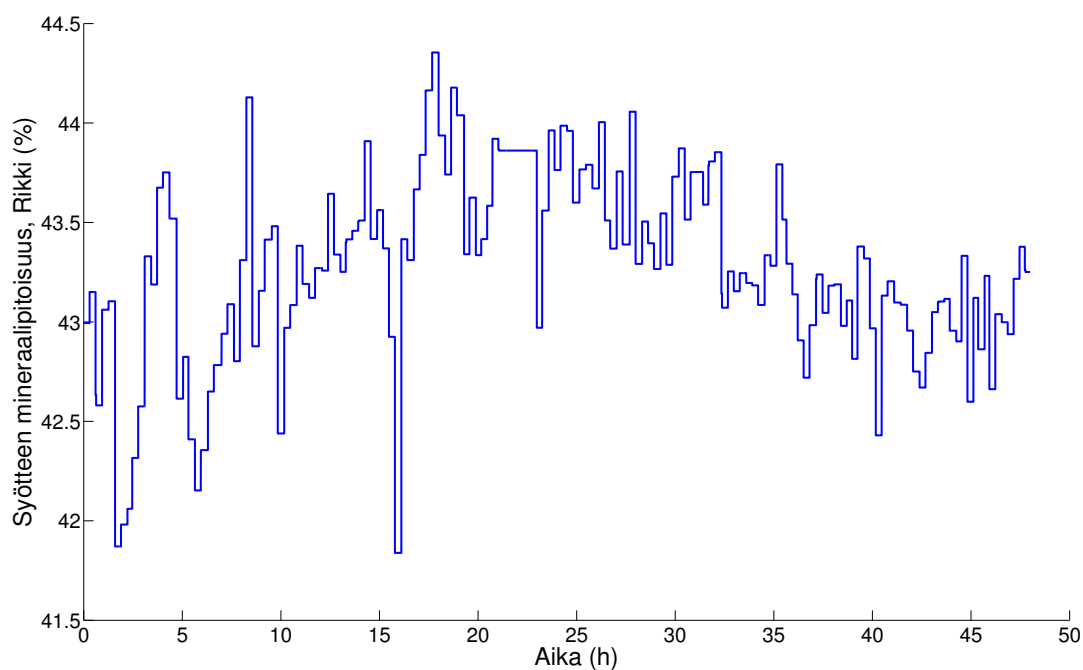
sa. Mallin epätäydellisyyksistä johtuen myös simulaattorin vasteet saadaan jonkin verran todellista prosessia paremmiksi; rikasteen kuparipitoisuus on korkeampi ja samaan aikaan saanti jätteeseen on alhaisempi kuin todellisessa prosessissa.

Erityisesti kuparin saanti simulaattorissa näyttää pysyvän koko ajan melko tasaisena, kun taas todellisessa prosessissa ajanhetkellä 30 h saanti muuttuu selvästi paremmaksi. Tämä ei selity syötteen muutoksilla, sillä syötteen pitoisuudet eivät tässä kohtaa muutu, kuten kuvista 19 ja 20 voidaan selvästi nähdä. Luultavasti rikastamolla on näin ollen tehty jokin asetusarvomuuotos tai prosessissa on tapahtunut jokin muu tuntematon muutos, jonka seurauksena saanti on selvästi parantunut. Myöskään selkeä muutos todellisen prosessin kuparirikasteen kuparipitoisuudessa (kuva 18) aikavälillä 5 - 8 h ei selity syötteen muutoksilla, eikä siten näy simulaattorin vasteessa. Näiden sijaan simulaattorin rikasteen kuparipitoisuus heijastaa muutoksia syötteen kuparipitoisuudessa koko simulointi-ikkunan ajalta. Alussa on havaittavissa hienoinen nousu sekä syötteen kuparipitoisuudessa että simulaation rikasteen kuparipitoisuudessa, joka kääntyy laskuun ajanhetken 10 tunnin kohdalla. Sama käyttäytyminen on havaittavissa myös todellisen prosessin rikasteen pitoisuudessa, mutta vain ajanhetkien 8 h ja 33 h välillä, sillä näillä hetkillä prosessissa tapahtuu jokin muutos, jota simulaattori ei pysty selittämään.

Kuvista huomataan siis selvästi, että joitain muutoksia prosessin vasteessa pystytään selittämään simulaattorin avulla, mutta on monia ilmiöitä, joita simulaattorissa ei ole mallinnettu ja joita ei siten pystytä selittämään. Simulaatioympäristössä ei huomioida tehtaan prosessin ohjausjärjestelmän asetusarvojen muutoksia tai mah-



Kuva 19: Rikastamolla mitatut syötteen mineraalipitoisuudet simulaatiokokeiden 1 ja 2 aikana. Syötteen kuparipitoisuus on merkitty kuvaan punaisella yhtenäisellä viivalla ja sinkin pitoisuus sinisellä katkoviivalla.



Kuva 20: Rikastamolla mitattu syötteen rikkipitoisuus kokeiden 1 ja 2 aikana.

dollisia manuaalisia ohjauksia. Myöskään kokonaissyötön vaihteluita ei oteta huomioon, sillä tästä ei ole suoraa mittausta saatavilla ja lisäksi Pyhäsalmen henkilö-

kunnan mukaan syötön tonnimäärän vaihtelut ovat pieniä. Näitä voitaisiin jatkossa harkita lisättävän osaksi adaptoituvaa simulaattoria, sillä erityisesti poikkeustilanteissa, kuten syötteen kuparipitoisuuden vaihdellessa suuresti, manuaalisia ohjauksia ja asetusarvomuuksia tehdään jonkin verran, mikä väistämättä lisää simulaattorin epätarkkuutta. Syötön määrä voi niinikään vaihdella erityisesti poikkeustilanteissa. Adaptoituvan simulaattorin olisi hyvä pystyä seuraamaan prosessia myös erikoistilanteissa, sillä tasapainotilassa olevaa vaahdotusprosessia voidaan simuloida myös tavallisella staattisella simulaattorilla.

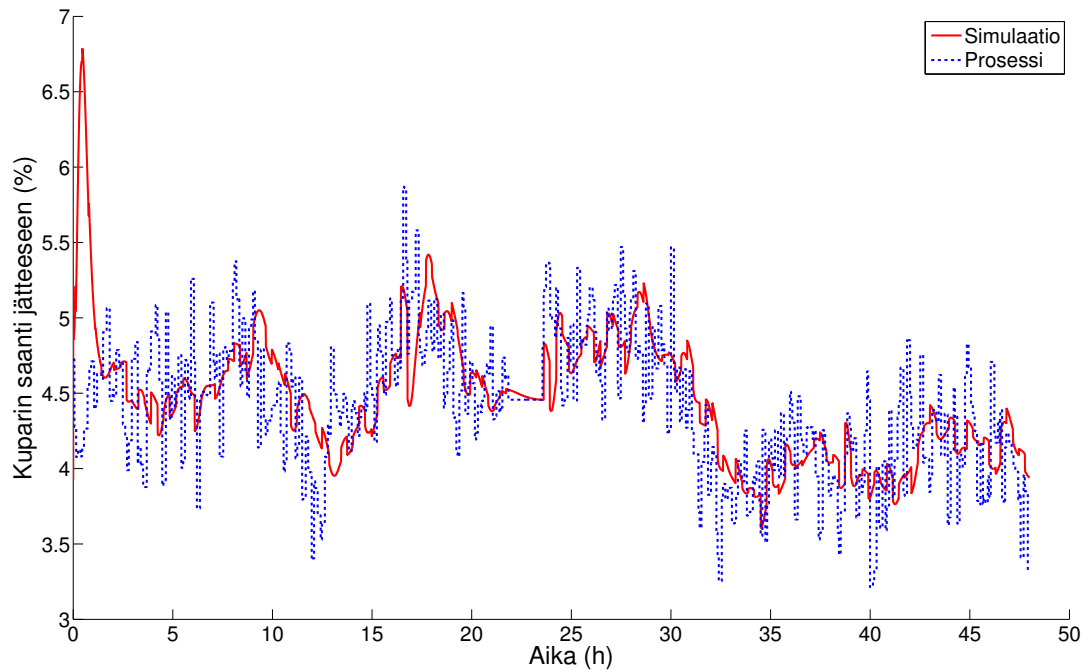
5.2 Adaptoituva simulaattori (koe 2)

Seuraavissa kuvissa nähdään adaptoituvan simulaattorin vaste samalta ajalta kuin edellisten kuvien simulaatiot ilman adaptointia. Kuvassa 21 näkyvät adaptoituvan simulaattorin ja Pyhäsalmen vaahdotusprosessin kuparipiirin kuparin saannit jätteeneseen, ja kuvassa 22 näkyvät systeemien rikasteiden kuparipitoisuudet. Koska simulaatio on ajettu samanaikaisesti edellä esitetyn adaptoimattoman simulaation kanssa, syötteen pitoisuudet ovat samat ja löytyvät kuvista 19 ja 20. Simulaation aloitushetkessä on pieni ero siten, että adaptoituva simulaatio on aloitettu hieman aikaisemmin kuin simulaatio ilman adaptointia, mutta tällä tarkkuudella piirrettyissä kuvissa ei liene tarpeellista piirtää uusia kuvia syötteen parametreista. Aikaeron suuruusluokka on noin 10 min. Koska nyt on kyseessä adaptoituva simulaattori, pyriitin ja kalkopyriitin vaahdotuskertoimet, joilla siis ohjataan kuparin saannin ja rikasteen pitoisuuden tasoja simulaattorissa, ovat erityisen mielenkiinnon kohteena. Näiden vaahdotuskerrointen arvot simulaation ajalta on piirretty kuvaan 23.

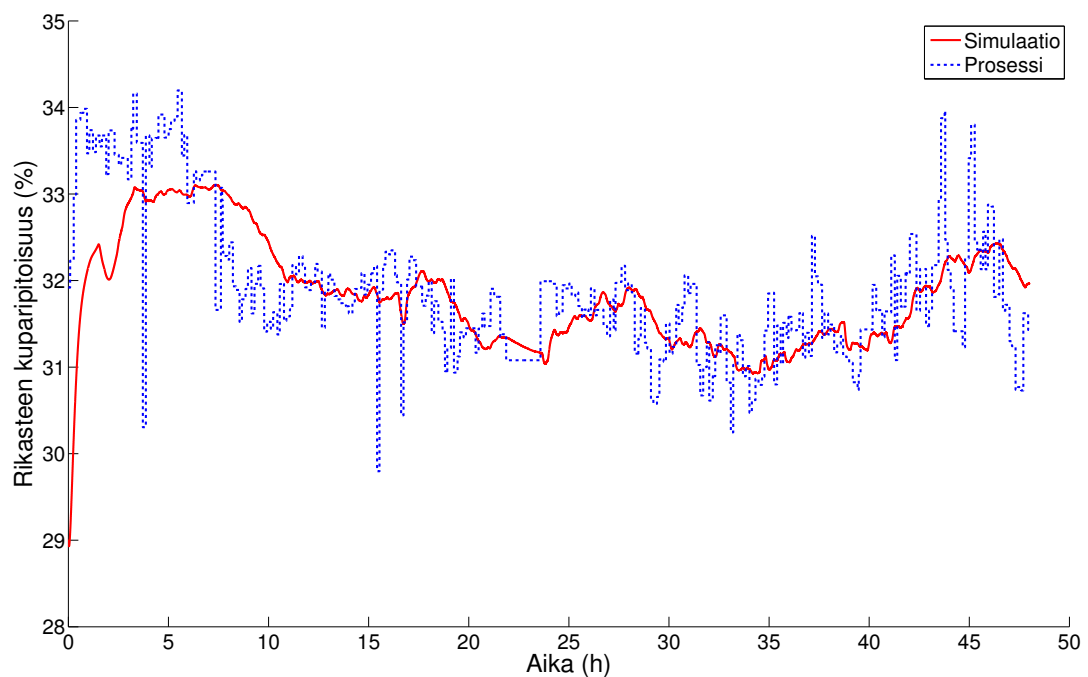
Adaptoituvan simulaation vasteissa on simulaation alussa havaittavissa selvä transienttivaihe. Tämä johtuu siitä, että vaahdotuskerrointen alkuarvaukset 0,2 ja 0,4 ovat kyllä hyvät, mutta harmillisesti juuri väärin päin. Tämän vuoksi simulaattorilla kestää hetki päästä todellisen prosessin mukaan, mutta noin 2 tunnin jälkeen adaptoituva simulaattori seuraa hyvin tarkasti todellisen prosessin kulkua kuparin saannin osalta. Rikasteen kuparipitoisuus asettuu lopulta oikealle tasolle noin 20 000 aika-askeleen kuluttua ajanhetkellä 10 h. Rikasteen pitoisuuden tasoa ohjaavan pyriitin vaahdotuskertoimen säätö on hieman maltillisempi siten, että P-kerroin on pienempi mutta I-termi vähän suurempi, joten sillä kestää alussa pidempään päästä samaan tasoon todellisen prosessin kanssa ja ylitys on samoin suurempi. Adaptointialgoritmin PI-säätimen kertoimet ovat taulukossa 3

Pyriitin vaahdotuskerroin on tässä simulaatiossa usein lähellä määritettyä alarajaa 0,1 tai jopa alarajalla siitä syystä, että todellisen prosessin vaste liikkuu myös poikkeuksellisissa lukemissa. Rikasteen kuparipitoisuus käy usein hyvin lähellä teoreettista ylärajaa 34,6 % ja keskiarvokin on 32 %:n tietämällä, kun simulaattorin normaali toimintaympäristö on noin 29 %:n tasolla. On kuitenkin hyvä huomata, että simulaattori pystyy seuraamaan prosessia poikkeuksellisissakin olosuhteissa.

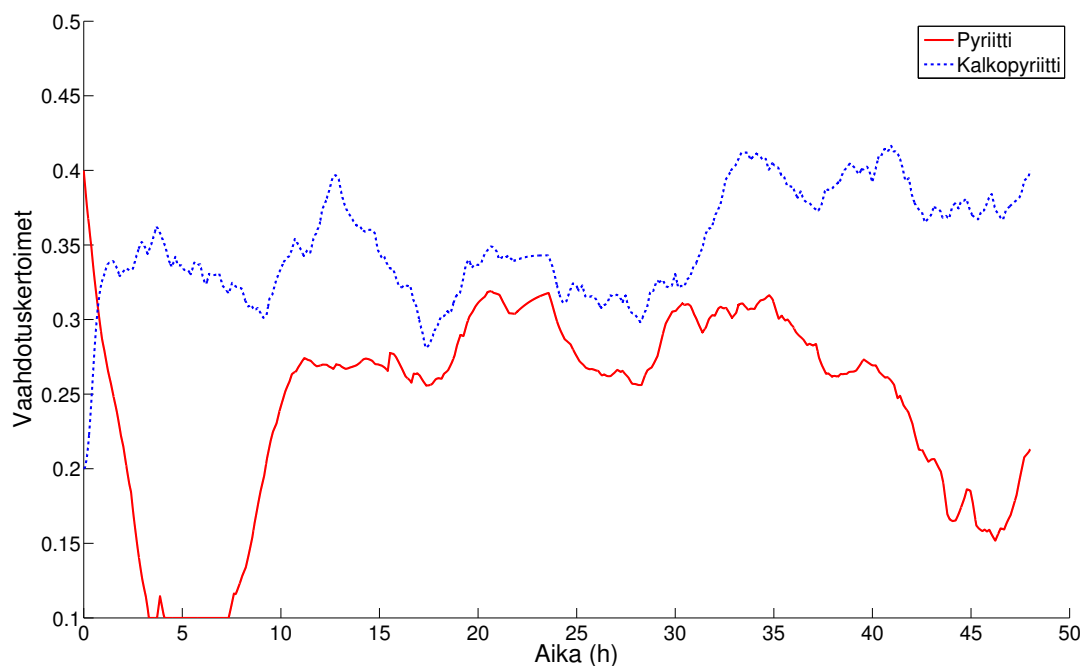
Mikäli simulaattori voisi mallintaa todellisen vaahdotusprosessin täydellisesti, vaahdotuskertoimia ei tarvitsisi muuttaa alun jälkeen juuri lainkaan, mikä ei tietenkään toteudu todellisessa simulaatiossa. Kuvista voidaan todeta, että alkutransientin jälkeen muutokset vaahdotuskertoimissa näyttävät melko pieniltä, mutta tästä



Kuva 21: Kuparin saanti jätteeseen adaptoituvassa simulaattorissa ja todellisessa prosessissa kokeen 2 aikana. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin laskettu vaste sinisellä katkoviivalla.



Kuva 22: Kuparirikasteen kuparipitoisuus adaptoituvassa simulaattorissa ja todellisessa prosessissa kokeen 2 aikana. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin mitattu vaste sinisellä katkoviivalla.



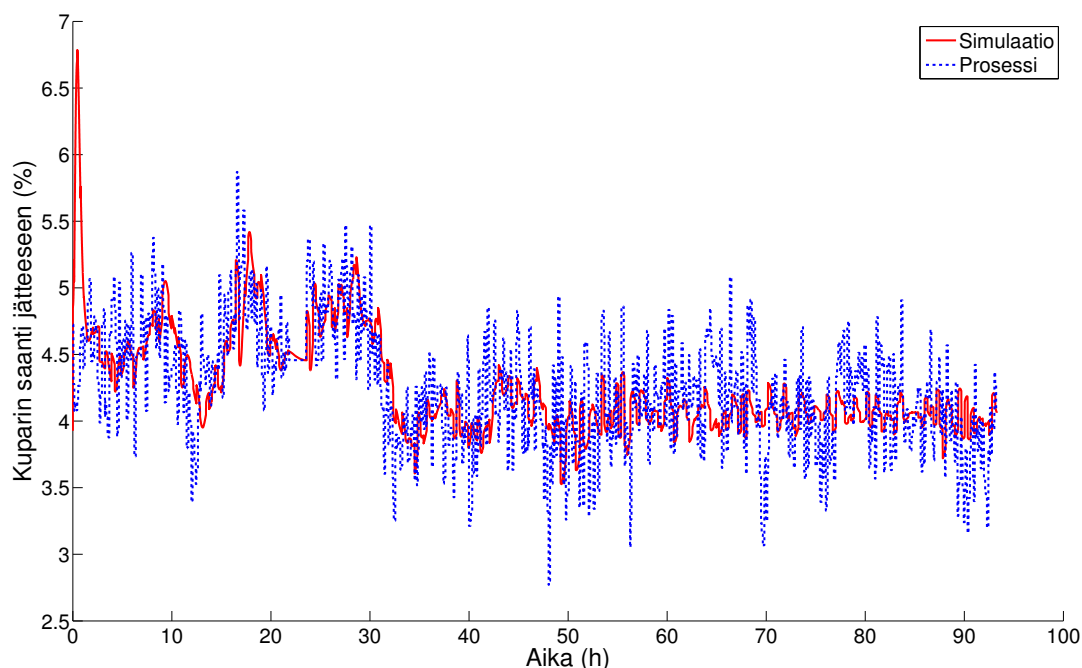
Kuva 23: Adaptoituvan simulaattorin pyriitin ja kalkopyriitin vaahdotuskerrointen arvot simulaation ajalta kokeen 2 aikana. Syötteen kuparipitoisuus on merkitty kuvaan punaisella yhtenäisellä viivalla ja sinkin pitoisuus sinisellä katkoviivalla.

Taulukko 3: Adaptoituvassa simulaatiossa kokeessa 2 käytetyt adaptointialgoritmin PI-säätimen kertoimet.

adaptointiparametri	kerroin	arvo
Kalkopyriitti	P	$5 * 10^{-5}$
Kalkopyriitti	I	$2,5 * 10^{-9}$
Pyriitti	P	$3 * 10^{-5}$
Pyriitti	I	$6 * 10^{-9}$

kokeesta ei yksin voida mitenkään nähdä, kuinka hyvin perustana oleva simulaattori kykenee selittämään vasteen muutoksia, ja kuinka paljon tästä on adaptoinnin ansiota. Voidaankin kysyä, mikä on adaptaation ja simulaatiomallin hyväksyttävä suhde tällaisessa adaptoituvassa simulaatiossa. Simulaattori voitaisiin saada aggressiivisella ohjauksella ja simulaation nopeutuksella seuraamaan todellisen prosessin vastetta vielä paljon tarkemmin, ja ehkä lähes mielivaltaisen tarkasti, mutta tämä ei olisi kovin mielekäästä.

5.3 Adaptoinnin kytkeminen pois käytöstä (koe 3)

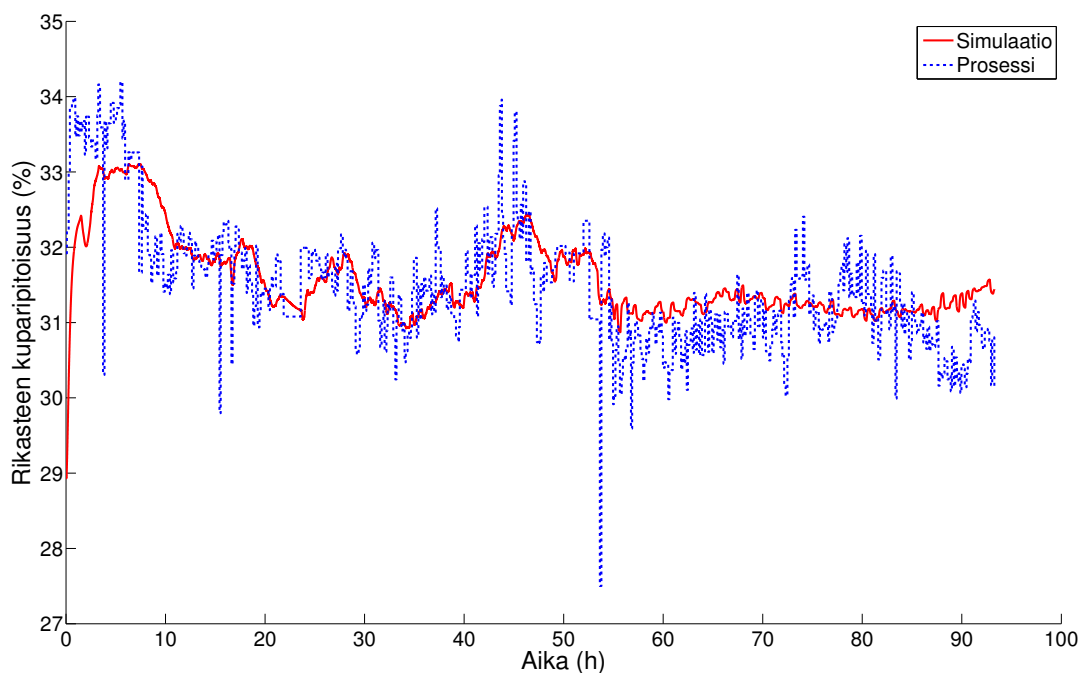


Kuva 24: Kuparin saanti jätteeseen todellisessa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, jossa adaptointi on n. ajanhetkellä 57 h kytketty pois päältä. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin laskettu vaste sinisellä katkoviivalla. (koe 3)

Jotta adaptoituvaa simulaattoria voitaisiin käyttää jonkinlaisen ennusteen laske-
miseksi, pitäisi selvittää, kuinka simulaattori käyttäytyy, kun adaptointi kytketään
pois päältä. Seuraako simulaattori tällöin lainkaan todellista prosessia, ja mitä si-
mulaatiossa yleensä tapahtuu tämän jälkeen? Kuvissa 24 ja 25 näkyy osittain sama
simulaatio kuin edellä, mutta tätä simulaatiota on jatkettu senkin jälkeen, kun adap-
tointi on noin ajanhetkellä 57 h kytketty pois päältä. Kuvassa 26, johon on piirretty
vaahdotuskertoimet simulaatiossa, näkyy erityisen hyvin ajanhetki, jolla adaptointi
kytketään pois käytöstä.

Kuparin saanti jätteeseen seuraa hämmästyttävän hyvin rikastamon vastetta sen-
kin jälkeen, kun adaptointi on kytketty pois. Toisaalta todellisen prosessin vastekin
on tässä hyvin tasainen, joten kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä ei yhden ko-
keen perusteella voida suoraan tehdä. Kuten ensimmäisessä kokeessa nähtiin, pelkät
syötemuutokset eivät aiheuta vasteeseen kovinkaan suuria muutoksia pieniä poikkeaa-
mia lukuunottamatta. Hyvä vastaavuus prosessin ja simulaation rikasteen saannin
osalta voisikin johtua siitä, että todellisessa prosessissa tapahtuu kokeen aikana hy-
vin vähän muutoksia. Kokeen perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että adaptoituvaa
simulaattoria näyttäisi pystyvän ennustamaan todellisen prosessin vastetta tulevai-
suudessa siinä tapauksessa, että todellinen prosessi on stabiilissa tasapainotilassa.

Ehkäpä hieman tyypillisempi esimerkki simulaattorin käytöksestä onkin samalla
ajalla simuloitu rikasteen kuparipitoisuus, joka pysyy samassa suuruusluokassa to-



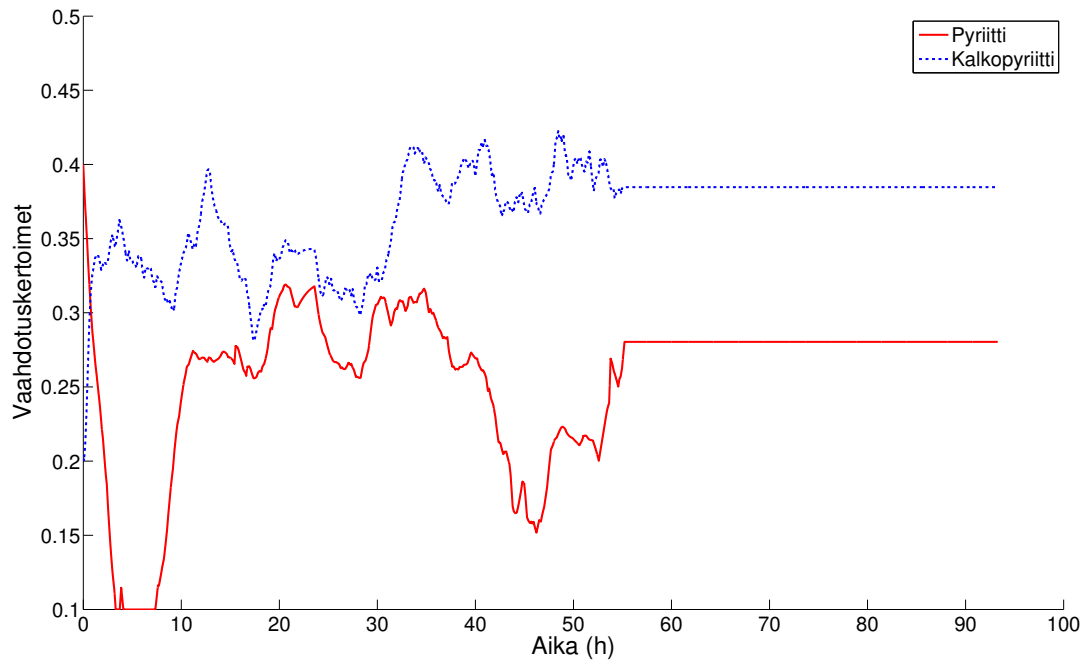
Kuva 25: Kuparirikasteen kuparipitoisuus todellisessa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, jossa adaptointi on n. ajanhetkellä 57 h kytketty pois päältä. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin mitattu vaste sinisellä katkoviivalla. (koe 3)

dellisen prosessin kanssa, mutta ei kuitenkaan seuraa sitä kovin tarkasti. Erityisesti aivan simulaation lopussa, noin 80 tunnin kohdalla, simulaation rikasteen pitoisuus lähtee selvään nousuun, kun samaan aikaan todellisen rikasteen pitoisuus laskee.

Tämä kertoo siitä, että tällä hetkellä käytössä oleva malli ei siis pysty kovin hyvin selittämään kaikkia prosessin vasteessa näkyviä ja prosessissa tapahtuvia muutoksia, vaikka otettaisiin huomioon syötteen muutokset. Tämä osittain nähtiin jo ensimmäisistä ilman adaptointia tehdyistä simuloinneista kohdassa 4.1, joissa selvästi prosessin vasteessa tapahtui paljon muutoksia, joita ei havaittu simulaattorissa. Toisaalta tässä kokeessa on simuloitu prosessia hyvin pitkä aika ilman adaptointia. Onko välttämättä järkevää olettaakaan, että voisimme simuloinnilla ennustaa prosessin tilaa useiden vuorokausien päähän?

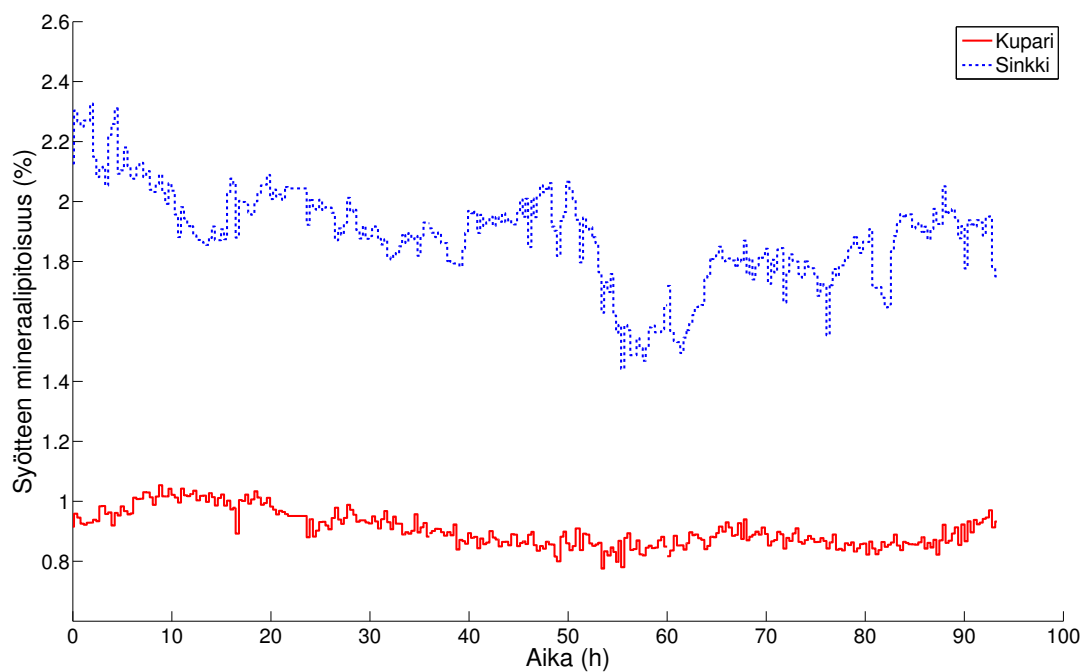
Kuten jo aiemmin ensimmäisissä kokeissa huomattiin, simulaattorissa adaptointin ollessa pois käytöstä rikasteen pitoisuus seuraa itse asiassa hyvin selvästi syötteen kuparipitoisuutta, joka on piirretty yhdessä syötteen sinkkipitoisuuden kanssa kuvaan 27. Tämä toki varmasti vaikuttaa myös todellisessa prosessissa rikasteen pitoisuuteen, mutta vaikutus ei ole lainkaan yhtä selkeä ja välitön. Syötteen rikkipitoisuus simulaation aikana näkyy kuvassa 28.

Tämän simulaatiokokeen perusteella vaikuttaisi hyvin vahvasti siltä, että simulaattori voisi kyetä kuitenkin lyhytaikaisen ennusteen tekemiseen todellisen prosessin kuparin saannista ja rikasteen kuparipitoisuudesta. Tämän kokeiden tuloksia tarkastellessa kannattaa kuitenkin huomioda, että vaikka tässä kytkettiin adaptointi

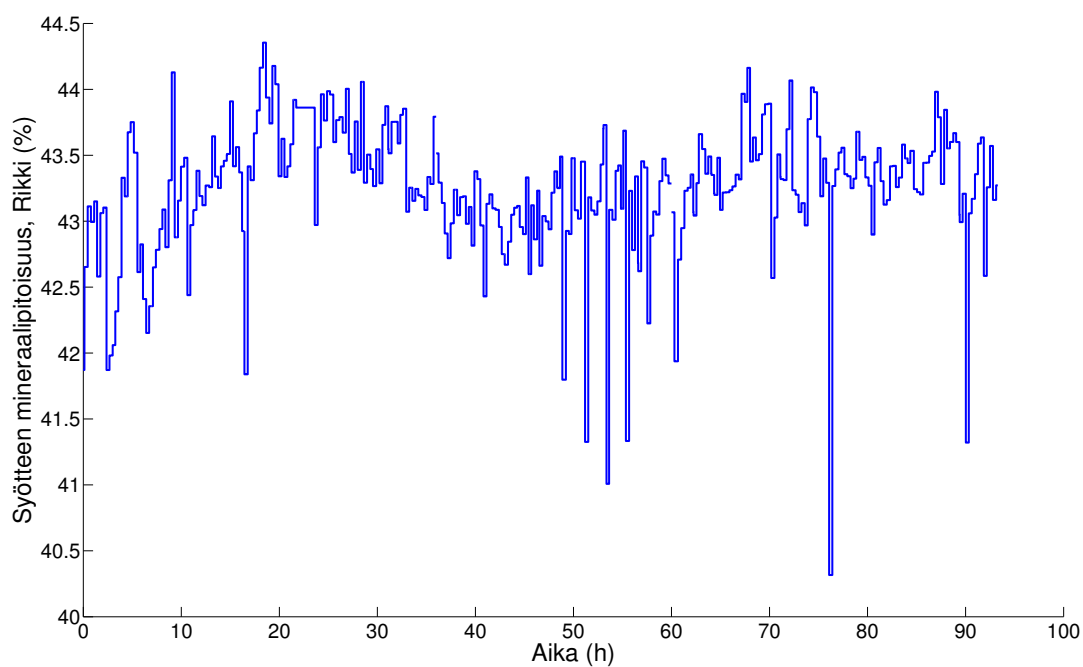


Kuva 26: Adaptoituvan simulaattorin pyriitin ja kalkopyriitin vaahdotuskerrointen arvot simulaation ajalta kokeessa 3. Pyriitin vaahdotuskerroin on merkitty kuvaan punaisella yhtenäisellä viivalla ja kalkopyriitin kerroin sinisellä katkoviivalla.

pois päältä, syötteen ominaisuudet menevät simulaattorille kokeen loppuun saakka. Mikäli simulaattori pystyisi esimerkiksi hakemaan ohjausmuutokset tehtaan tietokannasta ja päivittämään ne logiikkaemulaatioon simulaation aikana, tarkkuus voisi parantua vielä huomattavasti.



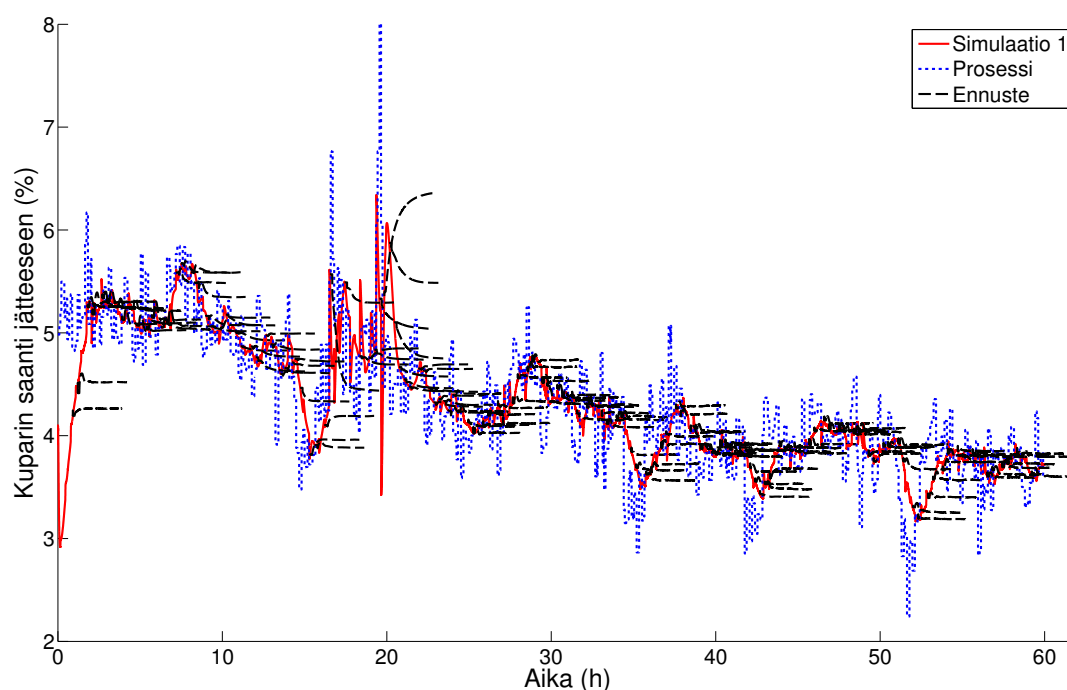
Kuva 27: Kuparin ja sinkin pitoisuudet syötteessä simulaation ajalta kokeessa 3. Syötteen kuparipitoisuus on merkitty kuvaan punaisella yhtenäisellä viivalla ja sinkin pitoisuus sinisellä katkoviivalla.



Kuva 28: Rikin pitoisuus syötteessä simulaation ajalta kokeessa 3.

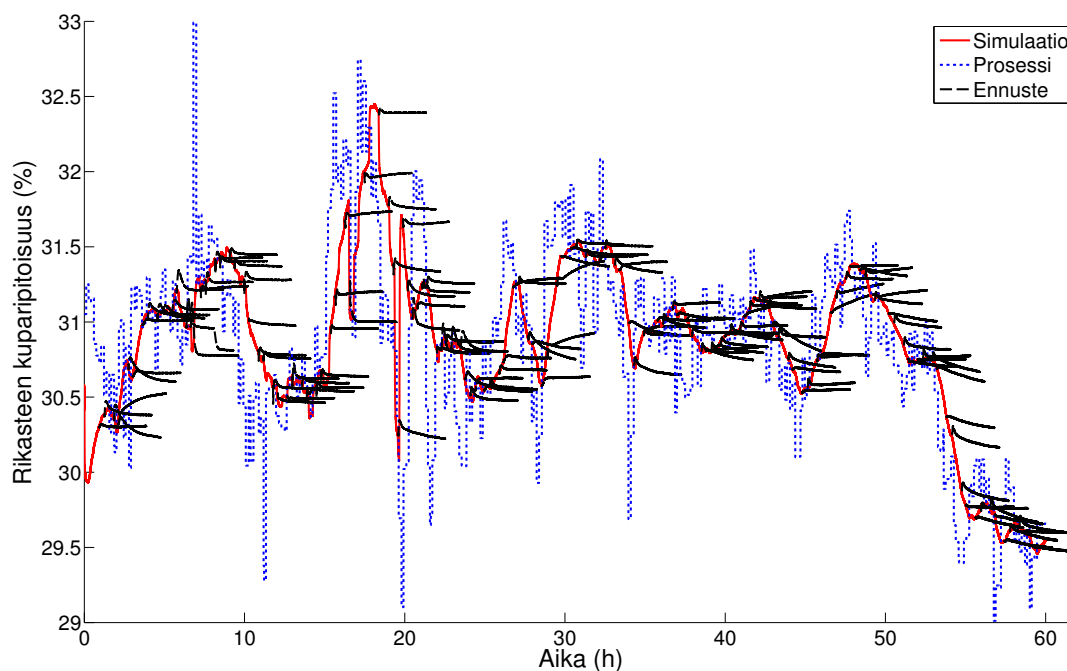
5.4 Jatkuvat ennusteet (koe 4)

Eräs idea adaptoituvan simulaattorin käyttökohteeksi on nk. jatkuvien ennusteiden laskenta. Edellä selvitettiin adaptoituvan simulaattorin soveltuvuutta tällaiseen kokeeseen ja nyt ennusteiden laskenta on lisätty simulaattoriin. Jatkuvilla ennusteilla tarkoitetaan tässä sitä, että yhtä simulaattoria adaptoidaan jatkuvasti ja sen apuna käytetään toisia simulaattoreita laskemaan ennusteita nopeutetusti. Näin voitaisiin saada periaatteessa joka hetkelle jonkinlainen ennuste prosessin tilasta lähitulevaisuudessa. Tämä olisi hyödyllistä erityisesti uusille ja kokemattomille prosessioperaattoreille, jotka voisivat suunnitella ennusteiden perusteella tulevia ohjauspäätöksiä, mikäli ennusteiden tarkkuus vain on riittävä.



Kuva 29: Kuparin saanti jätteeseen todellisessa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, johon on laskettu myös ennuste saannille. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin laskettu vaste sinisellä katkoviivalla. Lasketut ennusteet näkyvät mustalla katkoviivalla. (koe 4)

Kuvassa 29 näkyy eräs tällainen simulaatio, tai tarkemmin kuparin saanti simulaatiossa, jossa adaptoituvan simulaattorin ja todellisen prosessin vasteet näkyvät punaisella ja sinisellä kuten aiemminkin. Kuvassa 30 näkyvät rikasteen kuparipitoisuuden arvot simulaatiossa ja todellisessa prosessissa sekä kuparipitoisuudelle lasketut ennusteet. Uutta näissä kuvissa ovat mustalla katkoviivalla piirretyt ennusteet prosessin vasteesta. Kuvassa 31 näkyvät vaahdotuskertoimet simulaation ajalta, joiden muutokset kuvaavat adaptoinnin vahvuutta simulaation aikana. Pyriitin ja etenkin kalkopyriitin kertoimet ovat melko tasaiset, joten mitään erityisen vahvaa adaptointia ei ole simulaation aikana tarvittu. Tämä tarkoittaa hyvää myös ennusteiden kannalta, koska tällöin niillä on suurempi mahdollisuus olla lähempänä todellisuutta.

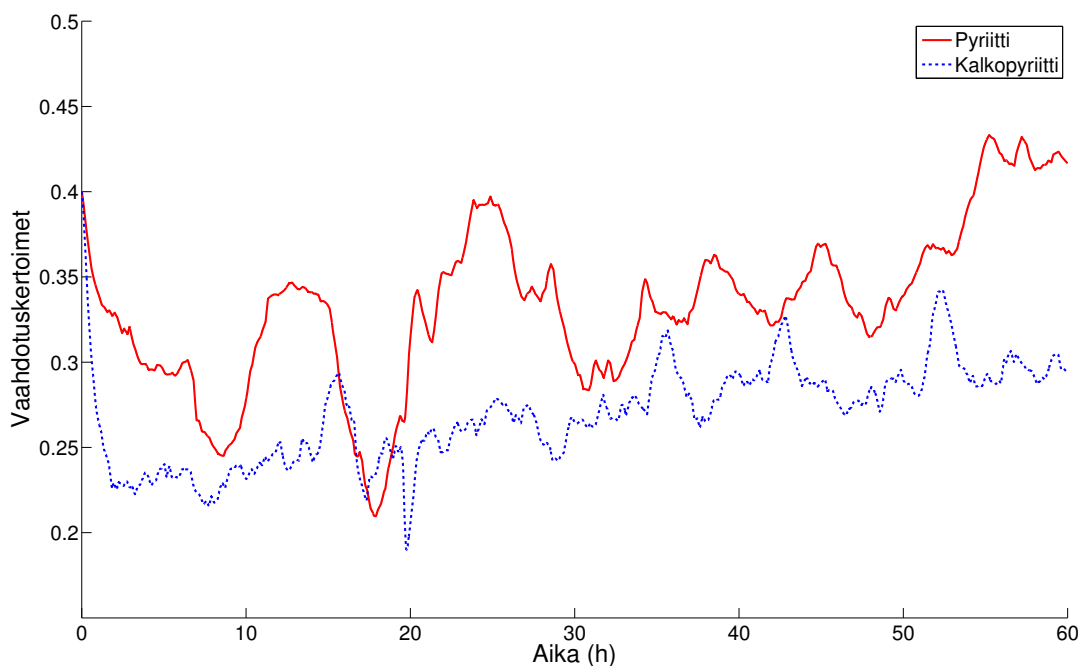


Kuva 30: Kuparirikasteen kuparipitoisuus todellisissa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, johon on laskettu myös ennuste. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin laskettu vaste sinisellä katkoviivalla. Lasketut ennusteet näkyvät mustalla katkoviivalla. (koe 4)

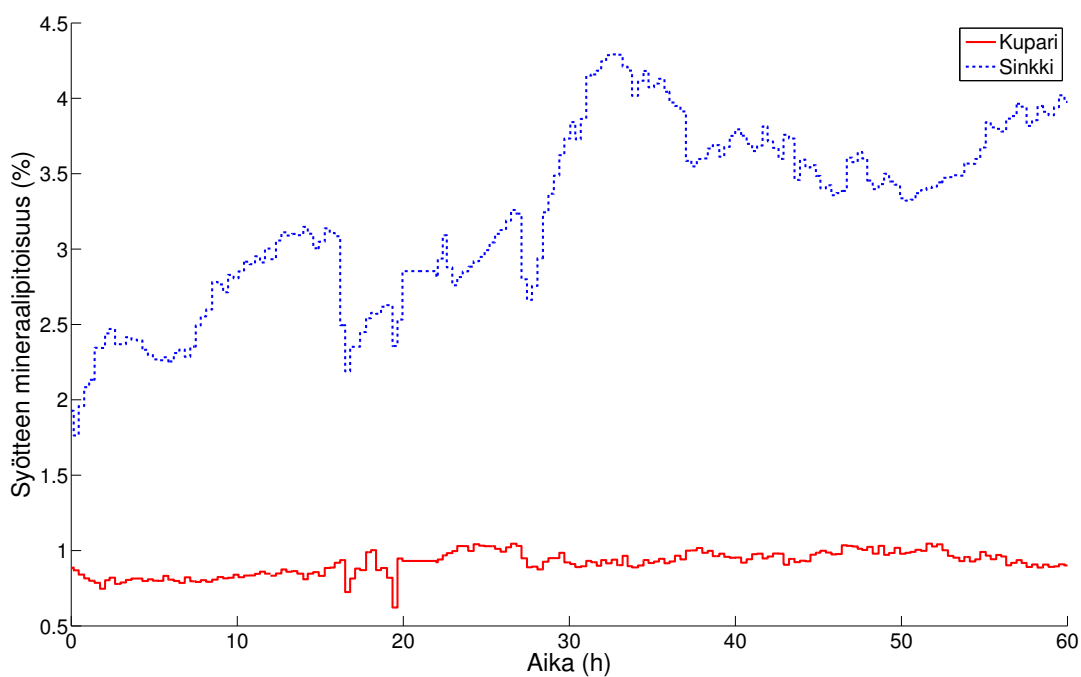
ta. Jos simulaation adaptointia pitäisi ohjata erittäin vahvasti, olisi turha odottaa, että ennusteet, jotka lasketaan ilman adaptointia, voisivat osua lähellekään oikeaan. Kuvissa 32 ja 33 näkyvät syötteen ominaisuudet simulaation ajalta. Sinkkipitoisuus syötteessä muuttuu melko paljon simulaation aikana, mikä saattaa vaikuttaa jonkin verran, mutta rikin ja kuparin osuudet pysyvät melko tasaisina.

Saannin ja rikasteen pitoisuuden kuvaajia on hienoisesti muokattu siten, että useimmista ennusteista on poistettu simulaation toiseen koneeseen siirtämisen aiheuttama häiriöpiikki rajoittamalla vasteen arvoja muutamien ensimmäisten simulaatioaskelten osalta. Ennustehan lasketaan siis niin, että simulaation ja logiikan tilat tallennetaan, siirretään toiseen koneeseen, jonka jälkeen jatketaan simulaatiota. Tässä ilmaantuvan häiriön alkuperää ei varmuudella tiedetä. Toisaalta nopeutetun simulaation säätöjen stabiilisuudessa on ollut muutenkin ongelmia, joten nämä häiriöt saattavat liittyä myös siihen, tai simulaation aika-askeleen muuttaminen itsessään saattaa olla häiriön syy. Muokkaamattomia kuvia voi tarkastella liitteessä B.

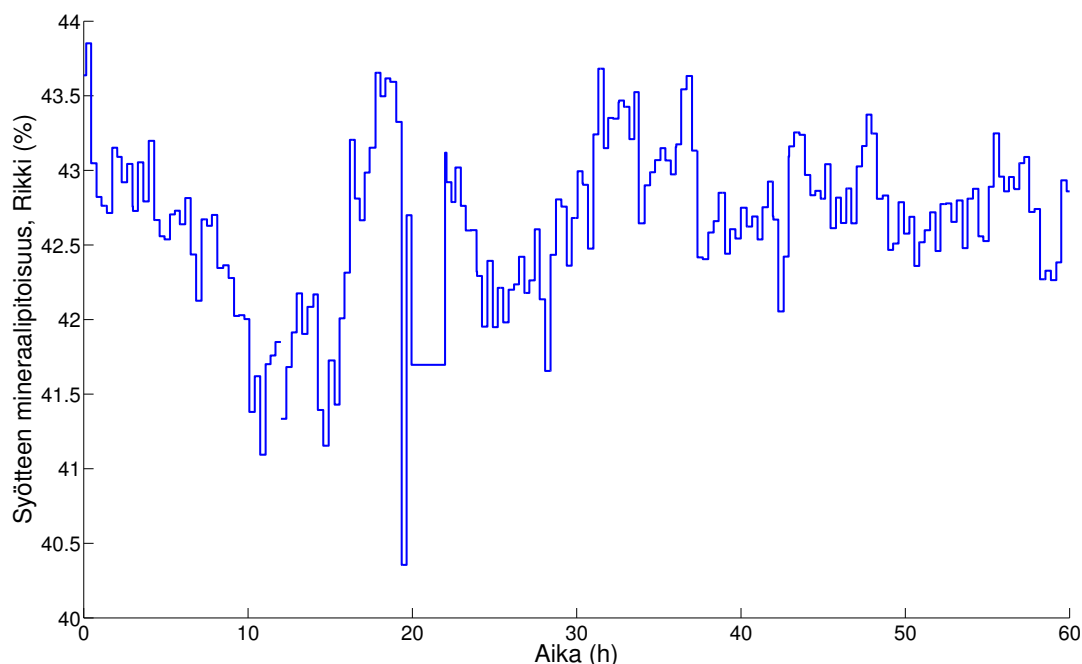
Kuvissa 29 ja 30 on useita mustalla katkoviivalla piirrettyjä ennusteita. Jokainen ennuste on piirretty alkamaan siitä kohdasta, jossa sen laskeminen on aloitettu ja sitä on jatkettu 10 000 simuloidun sekunnin ajan. Käytännössä ennusteen laskemiseen käytetään noin puoli tuntia, ja siitä saadaan vajaan kolmen tunnin mittainen ennuste. Ennusteita laskemaan varattuja simulaattoreita on tässä kokeessa kolme kappaletta, joten kullekin ajanhetkelle on periaatteessa useampi ennuste, jotka ulottuvat



Kuva 31: Adaptoituvan simulaattorin pyriitin ja kalkopyriitin vaahdotuskerrointen arvot simulaation ajalta. Pyriitin vaahdotuskerroin on merkitty kuvaan punaisella yhtenäisellä viivalla ja kalkopyriitin kerroin sinisellä katkoviivalla. (koe 4)



Kuva 32: Kuparin ja sinkin pitoisuudet syötteessä simulaation ajalta. Syöteen kuparipitoisuus on merkitty kuvaan punaisella yhtenäisellä viivalla ja sinkin pitoisuus sinisellä katkoviivalla. (koe 4)



Kuva 33: Rikin pitoisuus syötteenä simulaation ajalta. (koe 4)

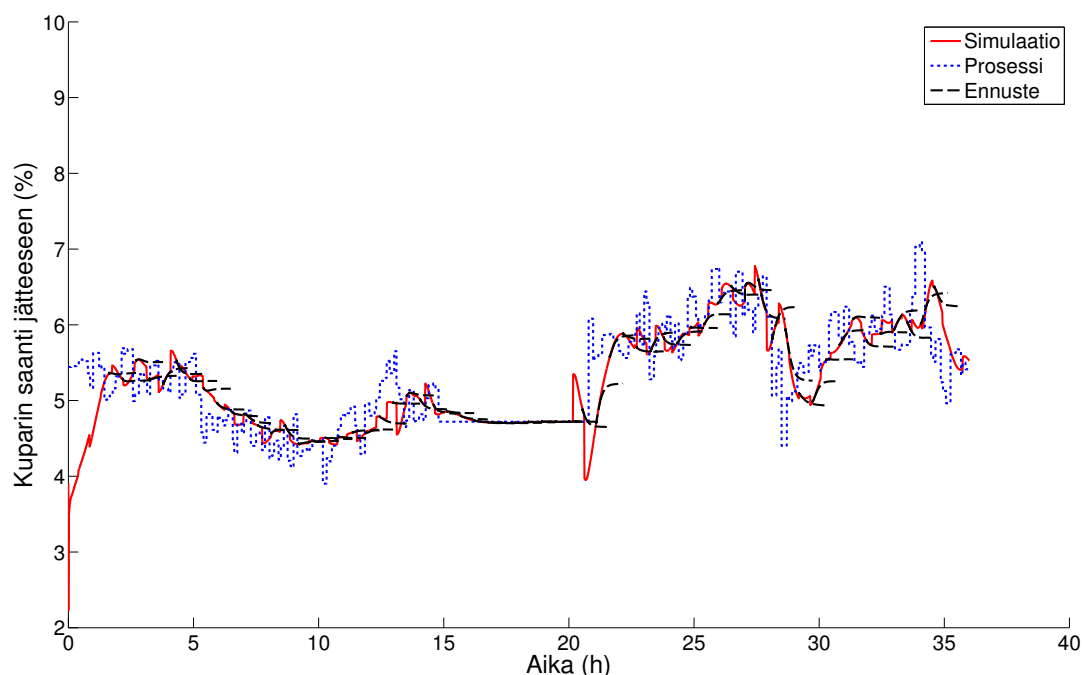
eri ajanhetkille tulevaisuuteen. Käytännössä simulaatio-ohjelmiston uudelleenkäynnistyksessä on ollut pieniä ongelmia, joten kuvista saattaa puuttua pari ennustetta, jos simulaattoria ei ole heti päästy käynnistämään manuaalisesti uudelleen. Tärkeintä on, että jokaisella ajanhetkellä on käytettävissä jokin ennuste prosessin tulevalle tilalle.

Erityisen kiinnostava kohta näissä kuvaajissa on aivan lopussa n. ajanhetkellä 60 h, jonka voidaan ajatella olevan simulaation käyttäjän nykyhetki, eli se hetki, jolloin operaattori sattuu katsomaan simulaattoria, tutkii prosessin tilaa yleensä ja harkitsee mahdollisten ohjausmuutosten tekemistä. Ideaalitilanteessa operaattori näkee heti ennusteesta, mikäli prosessi on etenemässä epätoivottuun suuntaan, jolloin hän voi aloittaa korjausten tekemisen ennen kuin epätoivottu tulos näkyy todellisen prosessin vasteessa. Valitettavasti simulaatiotulokset eivät vain ole tässä tapauksessa aivan niin informaatiopitoisia kuin voitaisiin toivoa.

Ennustekuvaajista nähdään, että ilman adaptointia tai syötteen pitoisuuden muutoksia simulaation vaste tasaantuu nopeasti, eivätkä ennustetut vasteet aina vastaa kovin hyvin prosessin tulevaa tilaa. Voisi olettaa, että tämä johtuu ainakin osittain myös ohjauslogiikan stabiloivista säädoistä, jotka pyrkivät tasaamaan prosessin tilan, mikä ilman ulkoisten häiriöiden vaikutusta tapahtuu simulaatiossa melko helposti. Aivan poikkeustapauksissa, kuten n. ajanhetkellä 20 h, ennusteessa näkyy selvä muutos, mutta tämäkin johtunee syötteen kuparipitoisuuden suuren muutoksen aiheuttamasta piikistä simulaattorin vasteeseen. Toisaalta voidaan pohtia, onko 3 tunnin mittainen ennuste jo liian pitkä. Ehkäpä olisi realistisempaa yrittää laskea hieman lyhyempiä ennusteita, sillä prosessin hitaudesta huolimatta on oletettavaa ettei pelkkä simulaattorin sisäinen dynamiikka riitä selittämään vasteen vaihteluita

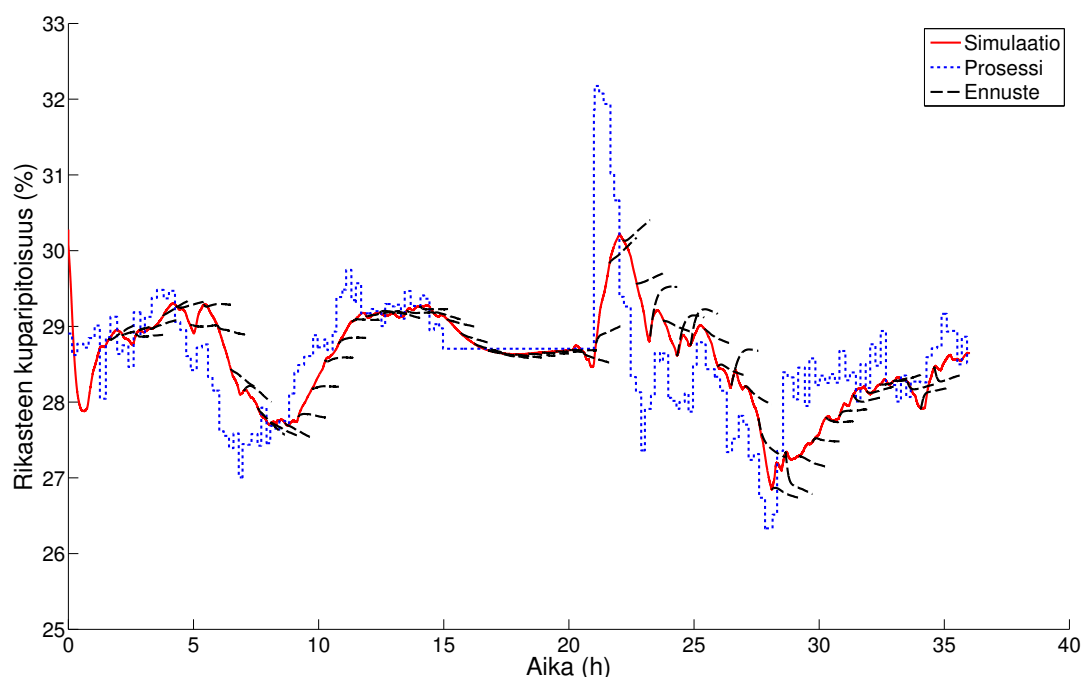
niin pitkälle tulevaisuuteen. Pyhäsalmen rikastamon Jarmo Huuskosen arvion mukaan muutosten asettumisaika on Pyhäsalmen prosessissa paikasta riippuen noin puolesta kahteen tuntiin. Tämä asettaa käytännössä ylärajan simulaattorilla lasketavan ennusteen pituudelle, mikäli ainoa ennusteen laskennan aikana käytettävissä oleva informaatio on prosessin sisäinen dynamiikka, koska ohjaukset ja syötteen ominaisuudet jäädytetään niihin arvoihin, jossa ne ennusteen laskennan alkaessa olivat.

5.5 Jatkuvat ennusteet lyhyellä aika-askeleella (koe 5)



Kuva 34: Kuparin saanti jätteeseen todellisessa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, johon on laskettu myös ennuste saannille. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin vaste sinisellä katkoviivalla. Lasketut ennusteet näkyvät mustalla katkoviivalla. (koe 5)

Tässä kokeessa on otettu huomioon edellisen kokeen ongelmakohdat. Koska edellä todettiin 3 tunnin ennusteikkunan olevan epärealistisen pitkä, kokeillaan nyt lyhyempää ennustetavoitetta, eli noin puolen tunnin mittaisen ennusteen laskemista ajossa olevalle vaahdotusprosessille. Myös simulaation nopeutus tuottaa ongelmia, joten voimme tehdä kokeen, jossa laskettava ennuste ei olekaan varsinainen ennuste siinä mielessä, että se lasketaan reaaliajassa simulaattorilla, jolla ajetaan yksinkertaista nopeutta. Tässäkin tapauksessa ennustesimulaatiossa jäädytetään sisääntulojen arvot, mutta voimme näin kokeilla ennusteen laskentaa ihanteellisessa tilanteessa. Tällöin voimme toivottavasti eliminoida häiriölähteet suurimmaksi osaksi ja nähdä, mihin simulaattori voisi ennusteiden laskennassa tällä hetkellä parhaimmillaan pystyä.

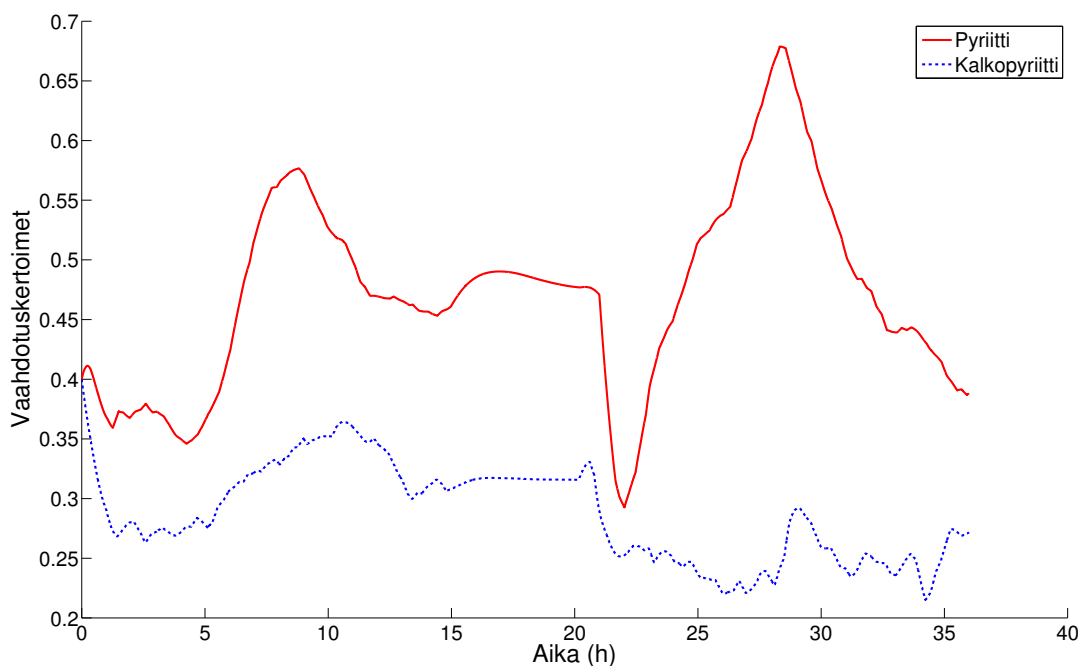


Kuva 35: Kuparirikasteen kuparipitoisuus todellisessa prosessissa sekä adaptoituvasa simulaattorissa, johon on laskettu myös ennuste saannille. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin vaste sinisellä katkoviivalla. Lasketut ennusteet näkyvät mustalla katkoviivalla. (koe 5)

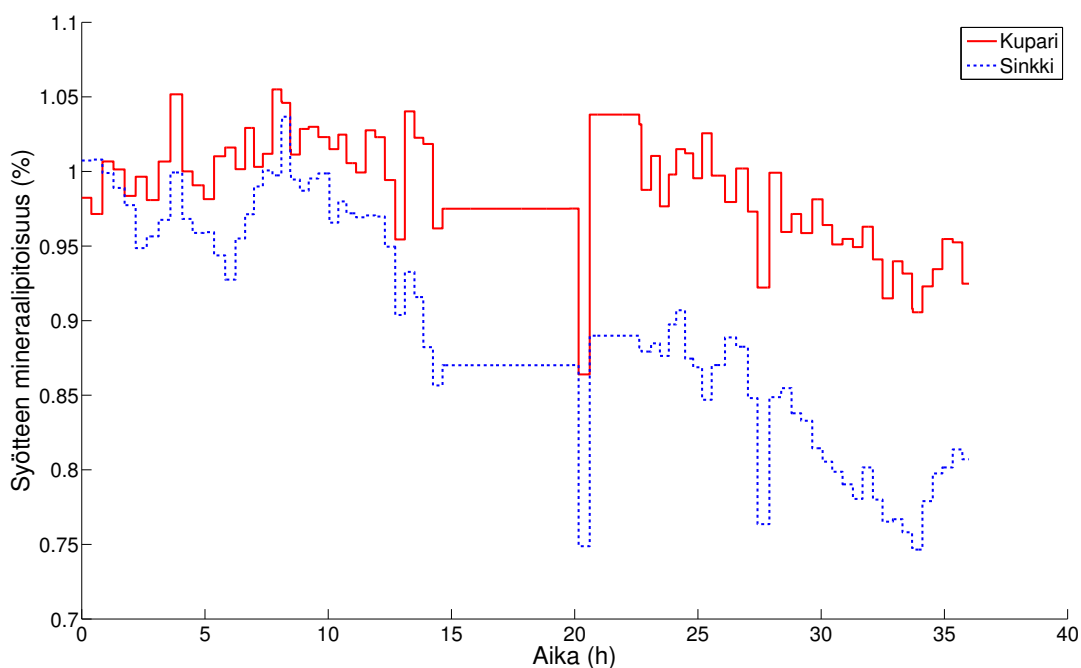
Kuvassa 34 nähdään kuparin saanti todellisessa prosessissa ja simulaatiossa sekä saannin ennusteet. Samoin kuvassa 35 nähdään kuparirikasteen kuparipitoisuuden todelliset ja simuloidut arvot sekä simulaatioennusteet. Kuvissa 36, 37 ja 38 nähdään adaptoituvan master-simulaation ohjausparametrien arvot simuloinnin ajalta sekä rikin, kuparin ja sinkin pitoisuudet syötteessä.

Ei-nopeutetusti lasketut ennusteet ovat selvästi ainakin kauniimpia ja häiriöttömämpiä kuin todelliset nopeutetut ennusteet. Kuparin saannin ennusteet näyttävät ensisilmäyksellä kohtuullisen hyviltä myös tarkkuuden osalta. Ajanhetkellä 15 - 20 h todellisessa prosessissa on mittauskatkos, joten tämän jälkeinen heilahtelu simulaattorissa lienee hyväksyttävää. Kuitenkin ajanhetkillä 28 h, 30 h ja 34 h todellisessa prosessissa vaste muuttaa selvästi suuntaa, mutta adaptoituva simulaatiojärjestelmä ei osaa ennustaa tätä lainkaan, vaan mustat ennustekuvaajat kuvassa osoittavat aivan toiseen suuntaan.

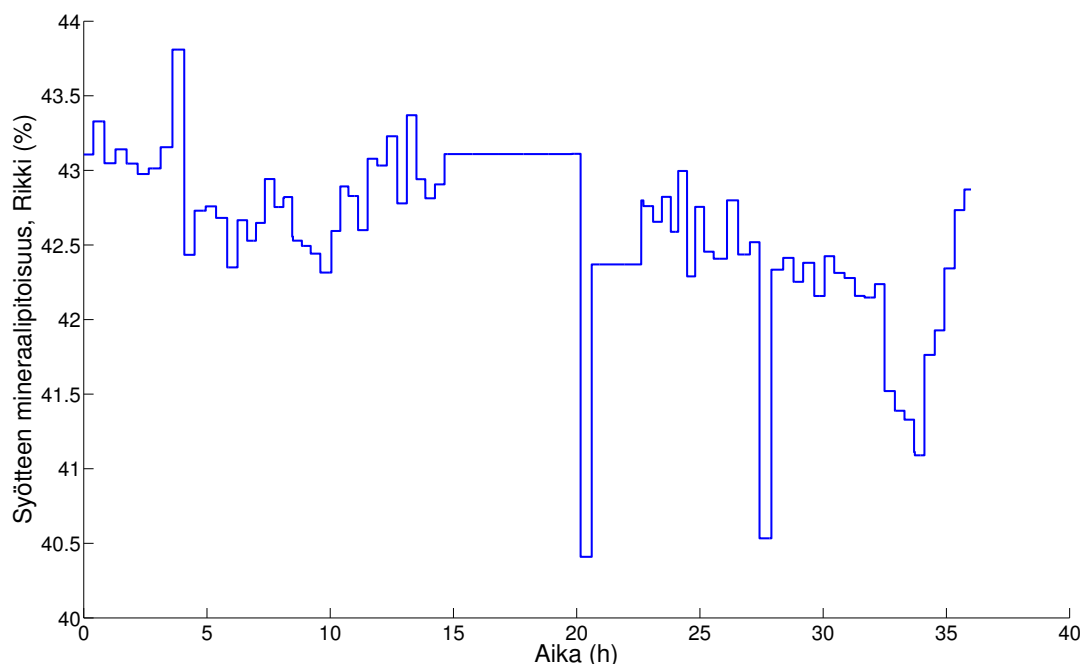
Rikasteen kuparipitoisuuden (kuva 35) ennusteet näyttävät myös häiriöttömiltä ja, toisin kuin edellisessä kokeessa (kuvat 29 - 33), tässä simulaattorin dynamiikka tarjoaa riittävästi vaihtelua ennusteen ajaksi, joten ennuste ei tasoitu vaan ennusteella on selvästi jokin suunta. Tähän varmasti vaikuttaa ennusteiden pituuden erot, sillä aiemmassa kokeessa ennusteen pituus oli kolme tuntia, kun nyt se on vain puoli tuntia. Tästä huolimatta ennusteet eivät näytä kovin käyttökelpoisilta. Ajanhetkille 21 - 22 h sijoittuvat ennusteet voidaan sivuuttaa jälleen häiriön aiheuttamina, mutta 9 h:n ja 28 h:n kohdalla ennusteet osoittavat selvästi väärään suuntaan.



Kuva 36: Adaptoituvan simulaattorin pyriitin ja kalkopyriitin vaahdotuskerrointen arvot simulaation ajalta. Pyriitin vaahdotuskerroin on merkitty kuvaan punaisella yhtenäisellä viivalla ja kalkopyriitin kerroin sinisellä katkoviivalla. (koe 5)



Kuva 37: Kuparin ja sinkin pitoisuudet syötessä simulaation ajalta. Syötteen kuparipitoisuus on merkitty kuvaan punaisella yhtenäisellä viivalla ja sinkin pitoisuus sinisellä katkoviivalla. (koe 5)



Kuva 38: Rikin pitoisuus syötteessä simulaation ajalta. (koe 5)

Rikasteen kuparipitoisuuden osalta ennusteet eivät muutenkaan vaikuta yhtä onnistuneelta kuin kuparin saannin ennusteet. Kuparipitoisuuden kuvaajassa on selvästi enemmän vaihteluita kuin kuparin saannin kuvaajassa ja näyttäisi siltä, että selvät muutokset rikasteen pitoisuudessa tai saannissa jäivät simulaattorilta selittämättä. Simulaattori näyttäisi yleensä osaavan ennustaa jatkuvan trendin vasteessa, mutta selvät suunnanmuutokset ovat sille liikaa.

5.6 Ohjauksen asetusravot (koe 6)

Edellisten alalukujen perusteella simulaattori ei kykene selittämään kovin hyvin muutoksia todellisen prosessin vasteessa. Tässä vaiheessa voitaisiin lähteä muokkaamaan simulointimallia tarkemmaksi, mutta ensin voidaan kokeilla myös aiemmin ohitettua keinoa prosessin säätöjen asetusravojen lisäämisestä simulaatiojärjestelmään. Aiemminhan oletettiin, että ohjaukset pysyvät pitkälti samoina, mutta tämä ei itse asiassa pidä täysin paikkaansa. Tehtaalta haetun 6 ja puolen vuorokauden mittaisen testidatan perusteella voidaan päätellä, että tehtaalla tehdään asetusravomuutoksia keskimäärin 3 kpl kahden minuutin aikana. Suurin osa näistä on varmastikin asiantuntijasäätöjärjestelmän optimoivia pieniä säätöjä, mutta tarkempi tutkimus osoittaa, että useamman päivän mittaiseen testijaksoon kuuluu useita isoja asetusravomuutoksia. Tässä analyysissa käytetyt kuvaajat löytyvät liitteestä C.

Tässä kokeessa palataan siinä mielessä aikaisempaan tilanteeseen, että tarkoitus ei ole laskea jatkuvasti uusia ennusteita prosessin rinnalla ajettavaan simulaattoriin vaan tutkia simulaattorin suorituskykyä tilanteessa, jossa adaptointi kytketään pois

päältä. Kuvassa 39 näkyy punaisella yhtenäisellä viivalla piirretty kuparin saanti simulaatiossa, jossa adaptointi kytketään pois päältä ajanhetkellä 6 h, mutta syötemuutokset sekä uutena ominaisuutena asetusarvojen muutokset päivitetään todellisesta prosessista. Vertailun vuoksi kuvaan on piirretty todellisen prosessin vaste sinisellä katkoviivalla ja vihreällä yhtenäisellä viivalla on nähtävissä vaste simulaatiossa, jossa myös asetusarvomutokset ja syötemuutokset jäädytetään viimeisimpään arvoonsa.

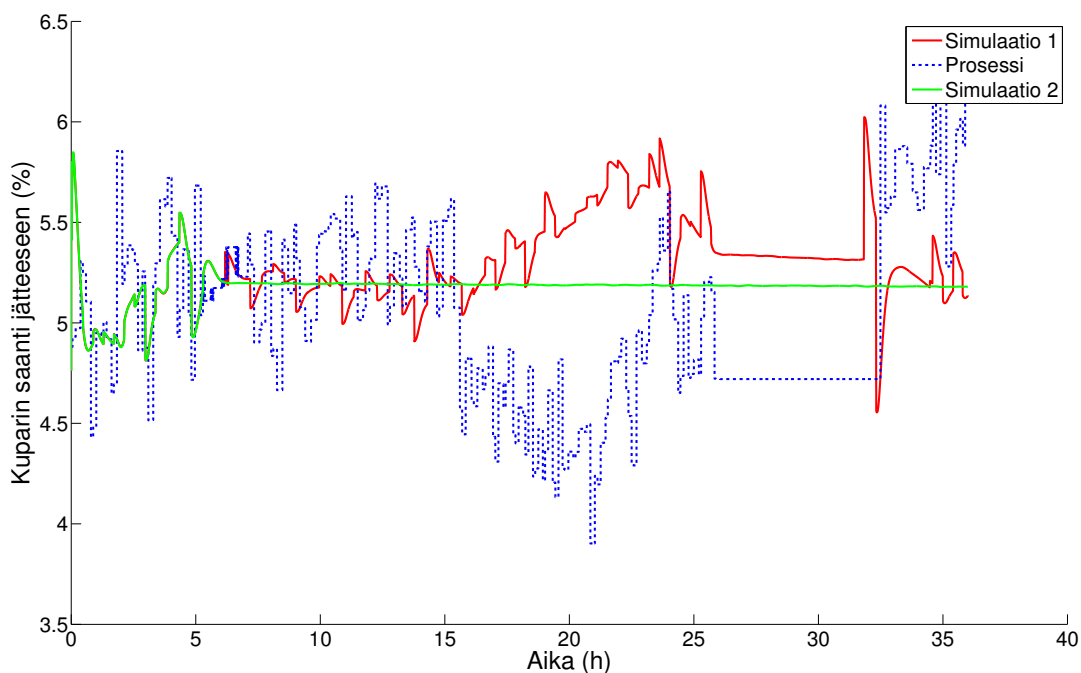
Samanlainen kuva on piirretty myös kuparirikasteen kuparipitoisuudesta (kuva 40). Simulaatioiden ohjausparametrit ovat identtiset, joten kuva 41 kertoo molempien simulaatioiden vaahdotuskerrointen käyttäytymisen simulaation aikana. Myös syötteet ovat identtiset, joten kuvat syötteen mineraalipitoisuuksista (kuvat 42 ja 43) pätevät niin todelliseen prosessiin kuin molempiin simulaatioihinkin. Kokonaissyöttö pidetään vakioarvossa 160 t/h. Todellisessa prosessissa on harmillinen mittaushäiriö ajanjaksolla 26 - 33 h, mutta se ei vaikuta simulaatioon ennen häiriötä.

Sekä rikasteen kuparipitoisuus että kuparin saanti jätteeseen lähtevät selvästi laskuun 15 tunnin kohdalla, mutta nämä eivät näy kummassakaan simulaatiossa. Simulaatiossa 1, jossa siis ovat mukana niin syötteen muutokset kuin ohjauksen asetusarvojen muutokset, vasteet lähtevät päin vastoin kohoamaan. Tämä johtuu prosessin ohjauksesta, joka lähtee korjaamaan todellisessa prosessissa tapahtuvaa kuparipitoisuuden laskua. Kuitenkaan simulaatiomalli ei pysty selittämään todellisessa prosessissa tapahtuvaa muutosta. Tämä muutos ei myöskään voi johtua syötteen muutoksista, sillä kuten syötekuvista (42 ja 43) nähdään, muutokset syötteessä ovat hyvin pieniä, ja aiemman kokemuksen perusteella syötemuutosten vaikutukset vasteeseen olivat niinkään hyvin pieniä. Hyvänä puolena kokeessa voidaan pitää sitä, että ohjauksen asetusarvomutokset näyttäisivät vaikuttavan simulaation samalla tavoin kuin todelliseenkin prosessiin, sillä sekä kuparin saannin että rikasteen kuparipitoisuuden vasteiden muoto on jokseenkin samankaltainen ajanhetkien 20 h ja 25 h välillä, vaikka vasteissa onkin kyseisellä ajanjaksolla selvä systemaattinen virhe.

5.7 Kokonaissyötön vaihtelut (koe 7)

Edellisen kokeen perusteella todettiin, että simulaatiomalli ei kykene selittämään prosessin vasteissa tapahtuvaa notkahdusta 20 h:n kohdalla. Simulaatiossa ei kuitenkaan tähän mennessä ole käytetty kokonaissyötön muutoksia, vaan se on oletettu vakioksi. Pyhäsalmen rikastamon henkilökunnan mukaan kokonaissyöttö pitäisi todellisessakin prosessissa pysyä melko vakiona, mutta rikastamon malmikuljettimien hihnavaaoilta saatavassa mittausdatassa (kuva 44) on ajanhetkellä 15 h selvä piikki. Kyseinen muutos kokonaissyötössä osuu hyvin yhteen prosessin häiriön kanssa, joten tehdään simulaatiokoe edellisen kokeen 6 mittausdatalla, ja otetaan lisäksi huomioon muutokset kokonaissyötössä.

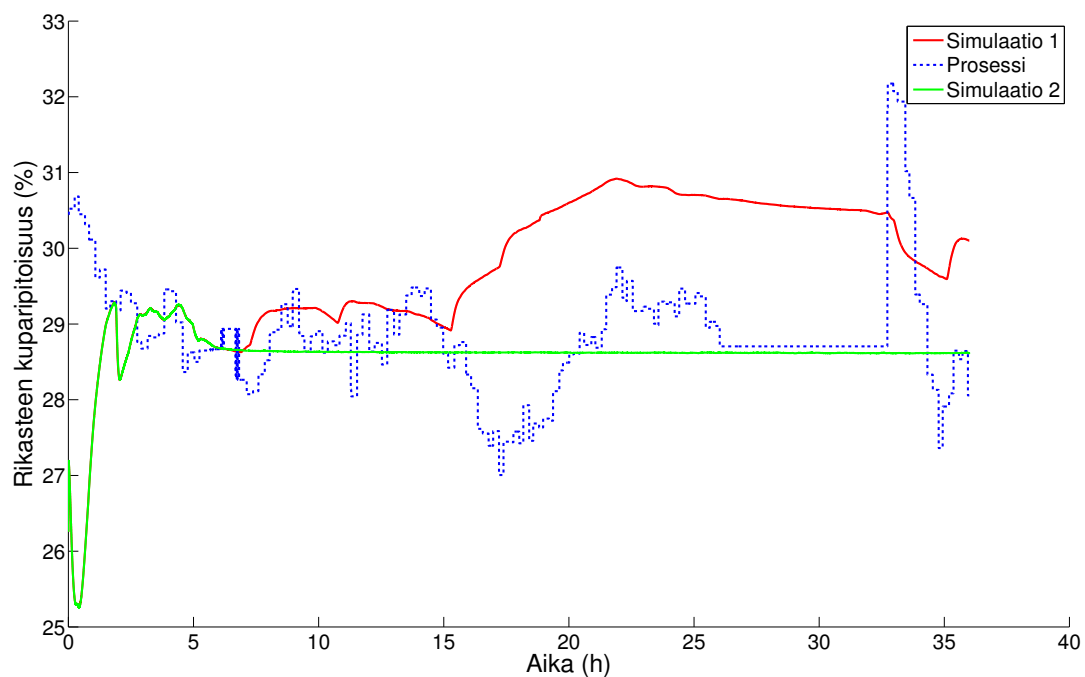
Kuvaan 45 on piirretty simulaation ja todellisen prosessin kuparin saanti ja kuvaan 46 prosessin ja simulaation rikasteen kuparipitoisuudet. Kuten aiemminkin, kokonaissyötön muutokset rikkovat simulaation siinä mielessä, että kuparin saanti jätteeseen lähtee hallitsemattomaan nousuun, mutta rikasteen kuparipitoisuuden kuvaaja on hyvin mielenkiintoinen. Kuvassa 46 simulaation vasteen muoto on hyvin



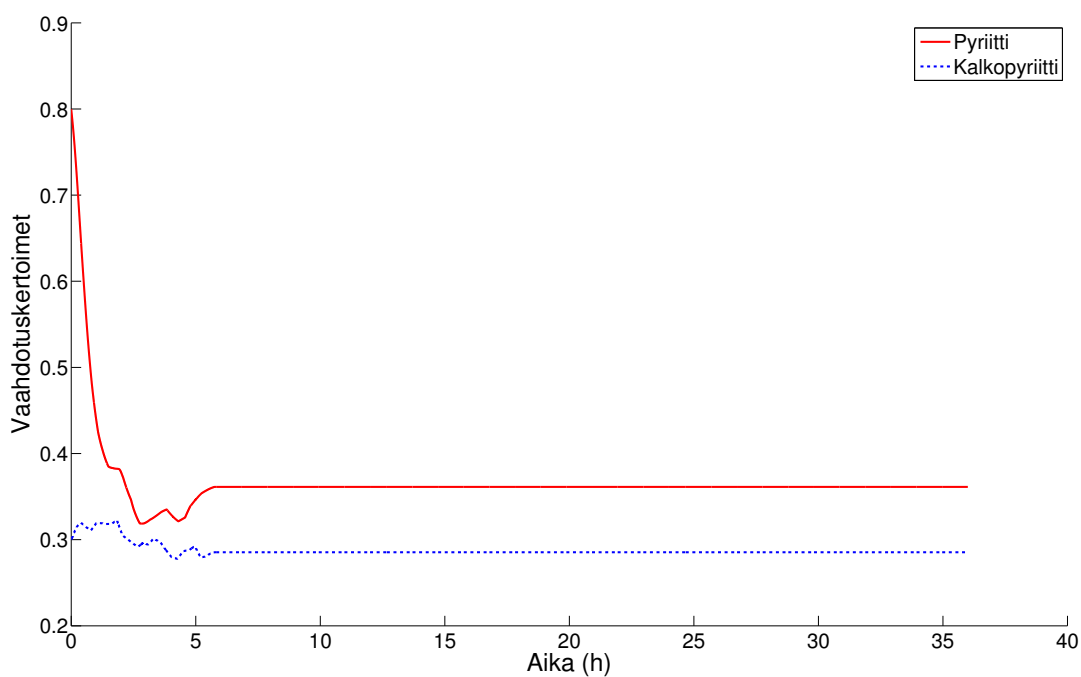
Kuva 39: Kuparin saanti jätteeseen todellisessa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, kun adaptointi kytketään pois päältä ajanhetkellä 6 h. Prosessin vaste on piirretty sinisellä katkoviivalla ja simulaatio, jossa ovat päällä sekä syötemuutokset että asetusarvomuutokset, on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla. Vertailun vuoksi kuvaajaan on piirretty myös vihreällä yhtenäisellä viivalla simulaatio, jossa kytketään pois adaptointi, syötemuutokset sekä asetusarvomuutokset. (koe 6)

samanlainen kuin todellisen prosessin vasteen muoto. Rikasteen kuparipitoisuus ko-
hoaa hieman todellista tasoa korkeammalla ja notkahdus tapahtuu hieman aiemmin,
mutta muoto on selvästi sama.

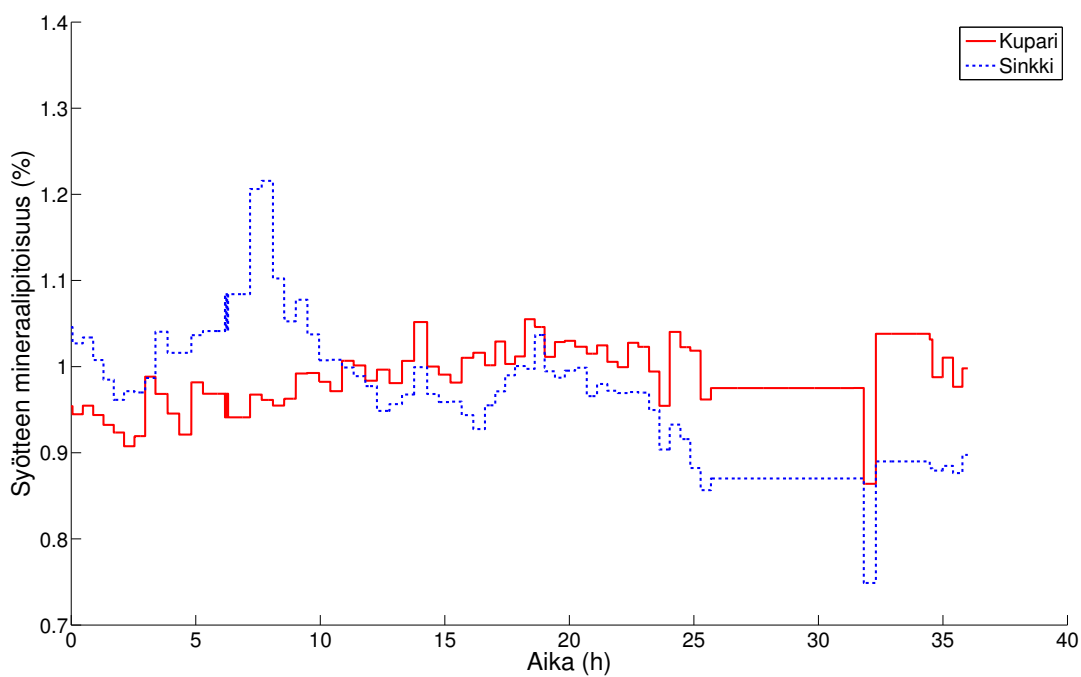
Tämän kokeen perusteella kokonaissyötön määrä voisi sittenkin vaikuttaa hy-
vin positiivisesti simulaation toimintaan. Piikki kokonaissyötön kuvaajassa sijoittuu
hieman rikasteen kuparipitoisuuden kuvaajan piikkiä aiempaan ajankohtaan, mikä
selittyy sillä, että kokonaissyötön mittaus kaivoksessa tehdään ennen jauhatusta.
Saatua mittausta ei voida suoraan sellaisenaan ajatella jatkossa käytettävän simu-
laatiossa, sillä hihnavaaoilta malmi kuljetetaan ensin siloihin, josta niitä pääste-
tään edelleen silon täyttöasteen ja kyseisen kokonaissyöttömittauksen perusteella
lisää jauhinmyllyihin. Vasta tämän jälkeen malmi syötetään vaahdotusprosessiin.
Tämän vuoksi ja toisaalta siksi, että tällä hetkellä simulaatiojärjestelmä ei kestä ko-
vin suuria muutoksia kokonaissyötössä, prosessista saatava mittaus ei sellaisenaan
käy simulaation syötteeksi.



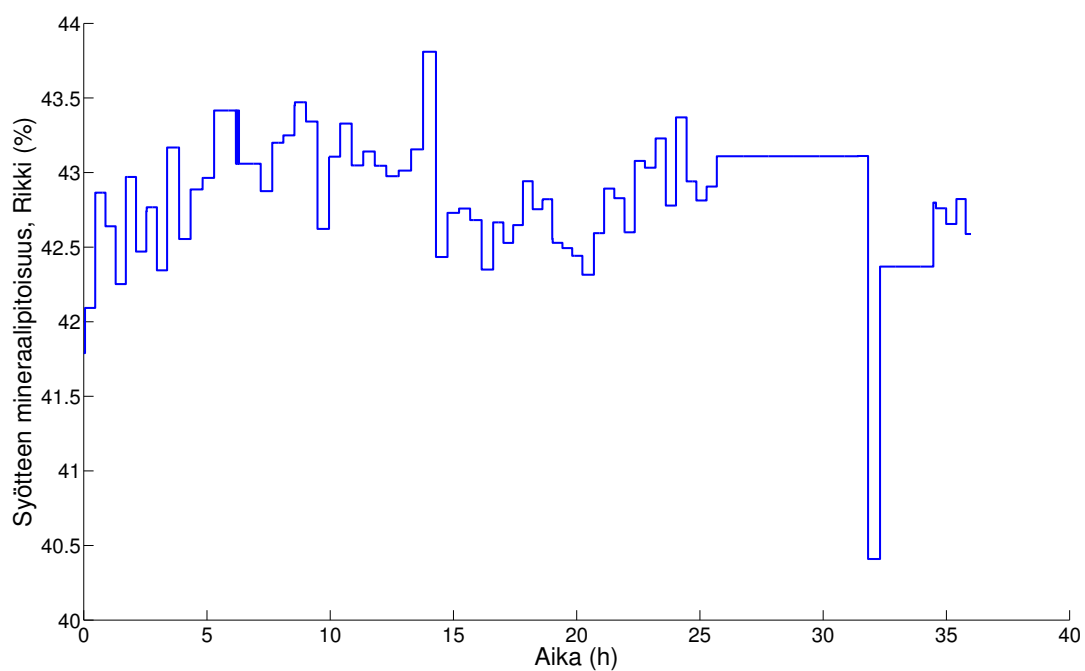
Kuva 40: Rikasteen kuparipitoisuus todellisessa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, kun adaptointi kytketään pois päältä ajanhetkellä 6 h. Prosessin vaste on piirretty sinisellä katkoviivalla ja simulaatio, jossa ovat päällä sekä syötemuutokset että asetusarvomuutokset, on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla. Vertailun vuoksi kuvaajaan on piirretty myös vihreällä yhtenäisellä viivalla simulaatio, jossa kytketään pois adaptointi, syötemuutokset sekä asetusarvomuutokset. (koe 6)



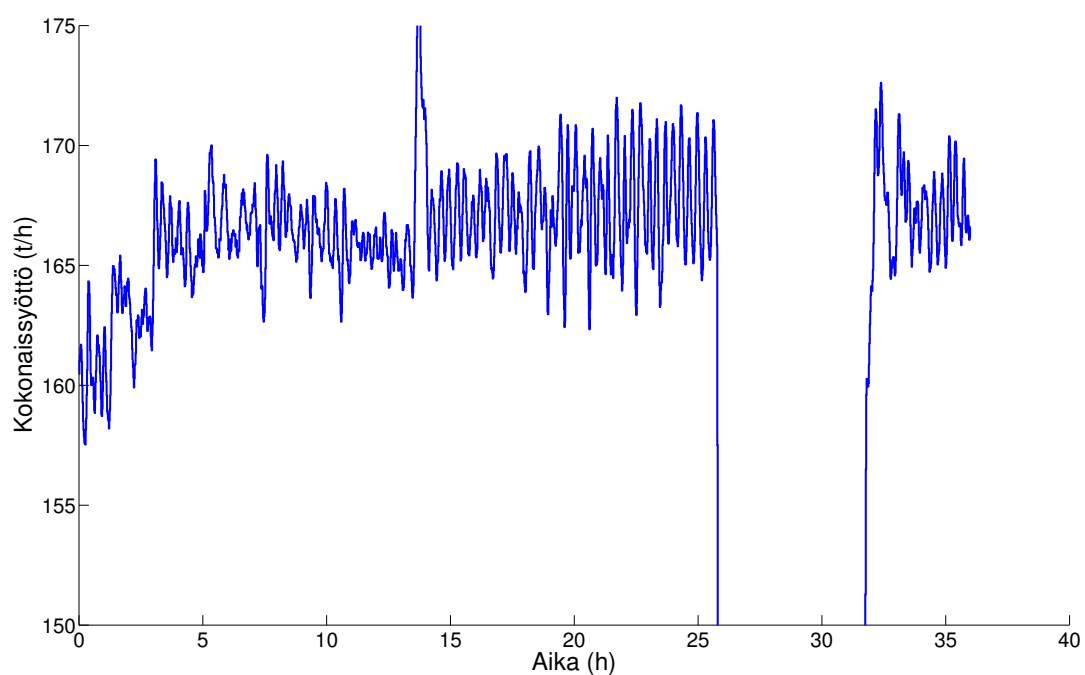
Kuva 41: Ohjausparametrit, eli kuparin ja rikin vaahdotuskertoimet adaptoituvassa simulaattorissa, kun adaptointi kytketään pois päältä ajanhetkellä 6 h. (koe 6)



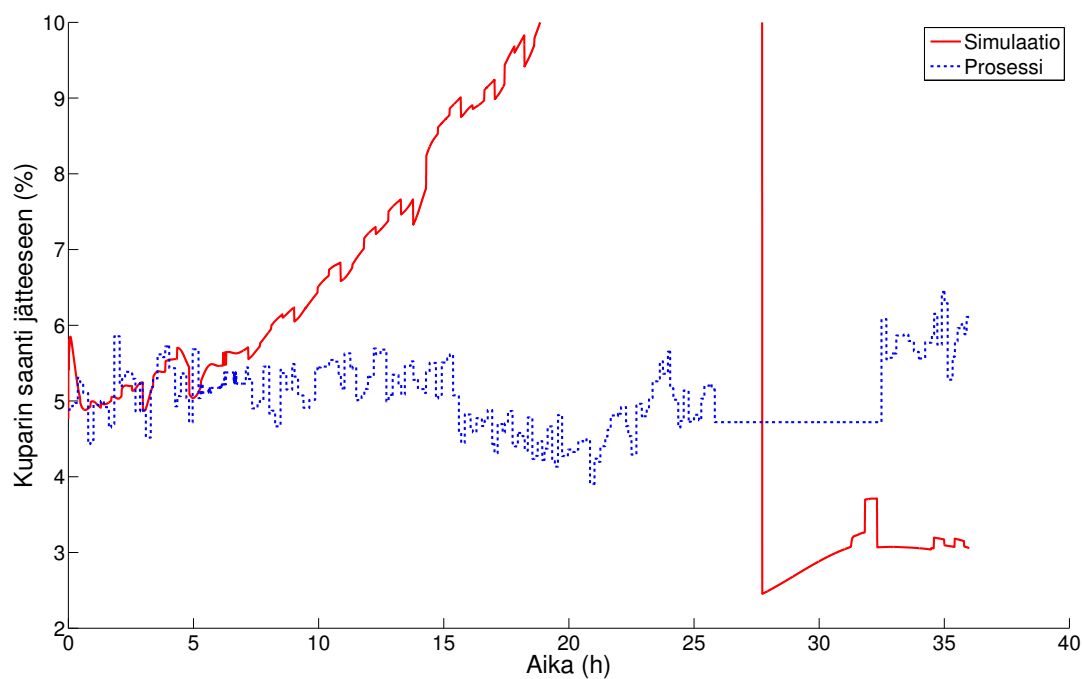
Kuva 42: Syötteen kuparipitoisuus ja sinkkipitoisuus kokeen aikana. (koe 6)



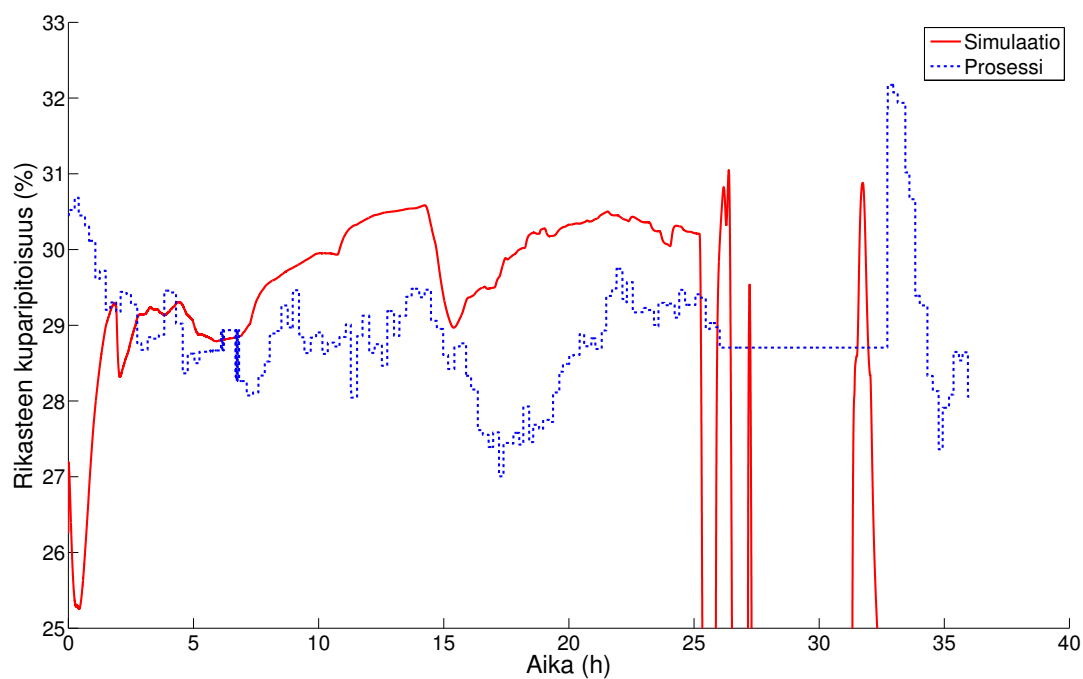
Kuva 43: Syötteen rikkipitoisuus kokeen aikana. (koe 6)



Kuva 44: Todellisen prosessin kokonaissyöttö mitattuna hihnavaaailta ennen jauhinyllä. (koe 7)



Kuva 45: Kuparin saanti todellisessa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, kun adaptointi kytketään pois päältä ajanhetkellä 6 h. Prosessin vaste on piirretty sinisellä katkoviivalla ja simulaatio, jossa ovat päällä syötemuutokset, asetusarvo-muutokset ja kokonaissyötön muutokset on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla. (koe 7)



Kuva 46: Rikasteen kuparipitoisuus todellisessa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, kun adaptointi kytketään pois päältä ajanhetkellä 6 h. Prosessin vaste on piirretty sinisellä katkoviivalla ja simulaatio, jossa ovat päällä syötemuutokset, asetusarvomutokset ja kokonaissyötön muutokset on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla. (koe 7)

6 Yhteenveto

Tämän työn tavoitteena on ollut tutkia mahdollisuutta rakentaa prosessia aktiivisesti seuraava ja sen rinnalla ajettava simulaattori, sekä toisaalta tutkia sen suorituskykyä ja pohtia erilaisia käyttötarkoituksia. Alussa esitellään adaptoituvan simulaattorin toimintaperiaate, kaksi prosessin rinnalla ajettavaa simulaattoria käsittelevää tutkimusta sekä vaahdotusprosessin tärkeimpiä ilmiöitä. Simulaatioympäristön rakenne on selitetty seikkaperäisesti luvussa 4, ja simulaatiojärjestelmällä saatuja tuloksia on esitetty luvussa 5. Tässä luvussa kerrataan vielä tärkeimmät asiat ja pohditaan työn saavutuksia ja mahdollisia vaihtoehtoja tulevalle tutkimukselle.

Adaptoituva simulaattori rakentuu jonkin dynaamisen simulaattorin pohjalle, ja sen parametrejä täytyy voida muokata ajon aikana, jotta simulaattoria voidaan adaptoida. Tässä työssä simulaattorina käytetään Outotec HSC -ohjelmistoa. Simulaattori tarvitsee yhteyden prosessitietokantaan, jotta saadaan tarvittavat tiedot todellisen prosessin vasteista ja syötteistä. Lisäksi pitää vielä valita ja toteuttaa sopiva adaptointialgoritmi, joka tässä työssä on PID-säädin. Näiden osien varaan voidaan rakentaa prosessin rinnalla ajettava simulaatiojärjestelmä, joka adaptoituu todelliseen prosessiin ja jota tässä työssä on käytetty simulaatioiden laskemiseen.

Vaikka periaate adaptoituvan simulaattorin rakentamiseen onkin yksinkertainen, ongelmiakin aina tulee eteen. Suurin tekninen ongelma tämän projektin aikana on ollut simulaation nopeutus ennusteiden laskentaa varten. Tähän on pohdittu kahta lähestymistapaa, jotka ovat täysin erilaisia. Simulaation laskentaa voidaan yrittää nopeuttaa siten, että Matlab-koodia optimoidaan ja toisistaan erilliset logiikkaemulaation laskenta ja HSC:n aika-askeleen laskenta muutetaan suoritettavaksi rinnakkain. Tämä on kuitenkin valtava urakka, johon ei ole haluttu toistaiseksi ryhtyä työ määrän ja pienen hyödyn vuoksi. Tällä voitaisiin korkeintaan saavuttaa noin kaksinkertainen laskentanopeus nykyiseen verrattuna. Simulaattorin nopeutettu laskenta suoritetaankin nyt kasvattamalla aika-askelta. Tällä voidaan saavuttaa huomattavasti edellä kuvattuja keinoja suurempi nopeutus, sillä aika-askel voidaan kasvattaa 4 sekuntiin, 10 sekuntiin tai vaikka 20 sekuntiin. Systemin aikavakiot ovat suuria, joten pitkältäkään tuntuva aika-askeleen valinnan ei pitäisi periaatteessa tuottaa ongelmia. Käytännössä ongelmia on ilmennyt nopeutetun simulaation stabiilisuudessa, sillä osaa säädöistä täytyy hieman muokata, jotta aika-askelta kasvattamalla nopeutettu simuloitu prosessi saadaan pysymään stabiilina. Tästä seuraa väistämättä epätarkkuutta simulaattoriin, sillä nyt säätöalgoritmien toiminta simulaatiossa ei olekaan enää täsmälleen samanlaista kuin todellisessa prosessissa.

Projektissa rakennettu adaptoituva simulaattori toimii teknisesti melko hyvin, mutta sen suorituskyky muuten jättää toivomisen varaa erityisesti ennusteiden laskentaa ajatellen. Simulaattori voidaan säätää seuraamaan prosessia hyvinkin tarkasti, mikäli näin halutaan, mutta tähän liittyy eräs adaptoituvan simulaattorin perustaan pureutuva kysymys. Mikä on adaptoituvassa simulaattorissa adaptaation sopiva tai hyväksyttävä määrä, tai mikä on adaptaation ja simulaation vaikutusten sopiva suhde vasteeseen? Olisihan mahdollista käyttää adaptoituvan simulaation perustana "simulaattoria", joka antaa aina vakiovasteen 1 kerrottuna vakiolla x , jota käytetään myös näin ollen adaptointiparametrina. Tällainen simulaattori saa-

taisiin seuraamaan mielivaltaisen tarkasti kohteena olevaa prosessia, mutta se olisi silti täysin hyödytön. Tuntuisikin mielekkäämmältä käyttää adaptointia etsimään sopiva toimintaympäristö simulaattorille, ja antaa perustana olevan simulaattorin yrittää selittää prosessin muutokset. Näyttää kuitenkin siltä, että tässä työssä kehitetty simulaattori ja työssä käytetty simulaatiomalli eivät aivan nykyisellään kykene selittämään prosessin toimintaa riittävällä tarkkuudella.

Erittäin mielenkiintoinen jatkotutkimuskohde olisikin adaptoituvan simulaattorin tarkkuuden parantaminen. Tähän voidaan pohtia kahta keinoa: simulaatiomallin muokkamista ja kokonaissyötön lisäämistä simulaatioon. Edellisen luvun viimeisen koetuloksen päätelmänä on, että kokonaissyötön muutoksilla tarkkuutta voitaisiin lisätä. Prosessista ei kuitenkaan saada suoraan haettua tietoa siitä, mikä on kuparipiirin kokonaissyöttö, sillä sellaista mittausta ei ole. Mittauksia on muutenkin jauhatuspiirissä ja muualla vaahdotusta edeltävässä prosessissa harvakseltaan, joten voitaisiin tutkia, onko mahdollista kehittää jokin keino laskea vaahdotuspiirin kokonaissyöttö saatavilla olevista mittauksista. Toinen vaihtoehto on, kuten edellä jo mainittiin, itse simulaatiomallin tarkkuuteen parantaminen. Projektissa on suunniteltu simulaation jakamista kahteen osaan adaptointia varten, jolloin eri osissa vaahdotuskertoimet voisivat olla erilaiset. Tämä on erittäin hyvä idea, jonka vaikutuksia kannattaisi ehdottomasti tutkia, sillä ei ole ollenkaan selvää, että prosessin tilan muuttuessa sellaisesta syystä, jota simulaattori ei pysty selittämään, vaahdotuskerrointen muutos eri simulaattorin osissa olisi sama. Tämä voitaisiin ratkaista jakamalla simulaation adaptointi useampaan osaan.

Tämän työn toinen päämäärä varsinaisen adaptoituvan simulaattorin tutkimisen ohella oli kehittää järjestelmä, joka voisi ennustaa prosessin tulevia arvoja jatkuvasti siten, että prosessioperaattorille olisi aina tarjolla ajantasainen ennuste siitä, millainen prosessin vaste on tietyn ajan kuluttua. Idea tällaisen järjestelmän rakentamisesta on houkutteleva, sillä se voisi parhaimmillaan olla hyvinkin hyödyllinen etenkin vähemmän kokeneiden prosessioperaattoreiden tukena. Käytännössä näen tässä joitain pieniä ongelmia, jotka olisi hyvä selvittää tulevaisuuden tutkimuksissa.

Kun ennustetta lähdetään laskemaan, simulaattorilla ei ole tietoa tulevista syöteistä eikä ohjauksista, vaan syötteen ja ohjauksen asetusarvot jäädytetään niihin arvoihin, jossa ne olivat ennusteen laskennan alkaessa. Tällöin ainoa muuttuja, joka voi aiheuttaa muutoksia simulaattorin vasteeseen, on simulaattorin sisäinen dynamiikka. Mikäli tämä on ainoa simulaation vasteeseen vaikuttava tekijä, ennustetta ei voida ajatella laskettavan ainakaan kovin pitkälle tulevaisuuteen, sillä Pyhäsalmen henkilökunnan arvion mukaan muutosten asettumisaika kuparipiirissä on kennosta riippuen puolesta kahteen tuntiin. Voidaankin sanoa, että tämän pidempää ennustetta ei simulaatiojärjestelmällä voida tehdä, sillä systeemissä ei yksinkertaisesti ole mitään informaatiota, josta pidempää ennustetta voitaisiin laskea. Muutosten asettumisaika todellisessa prosessissa määrittelee siis ylärajan ennusteen pituudelle.

Ottaen nämä seikat huomioon ennusteen laskennan tutkimuksessa voitaisiin harkita otettavan mukaan jonkinlainen ennuste tulevista syötteen arvoista. Tähän voitaisiin käyttää hyvinkin kaukaista ennustetta, kuten geologin arviota tietystä kohdasta louhittavan malmin mineraalipitoisuuksista, tai kenties uutta mittausta aiemmasta kohdasta prosessia. Olisiko esimerkiksi mahdollista tehdä jonkinlainen karkea

analyysi hihnakuiljettimien siirtämästä malmista? Toisaalta hihnakuiljettimien kokonaissyötön mittausta voitaisiin varmasti hyödyntää lähitulevaisuuden kokonaissyötön arvioinnissa kuparipiirille, sillä tämä mittausta sijaitsee todellisessa prosessissa huomattavasti ennen vaahdotusta. Mikäli näin voitaisiin ennustaa lähitulevaisuuden muutoksia prosessin syötteelle, voitaisiin simulaattoriin lisätä myös kopio rikastamolla käytettävästä asiantuntijasäätöjärjestelmästä. Tällöin käytössä olisi sekä arviot syötteen muutoksista että näiden aiheuttamat muutokset ohjauksiin, joten simulaattorin ennusteiden tarkkuus voisi parantua merkittävästi. Tämän selvittäminen vaatii lisätutkimuksia.

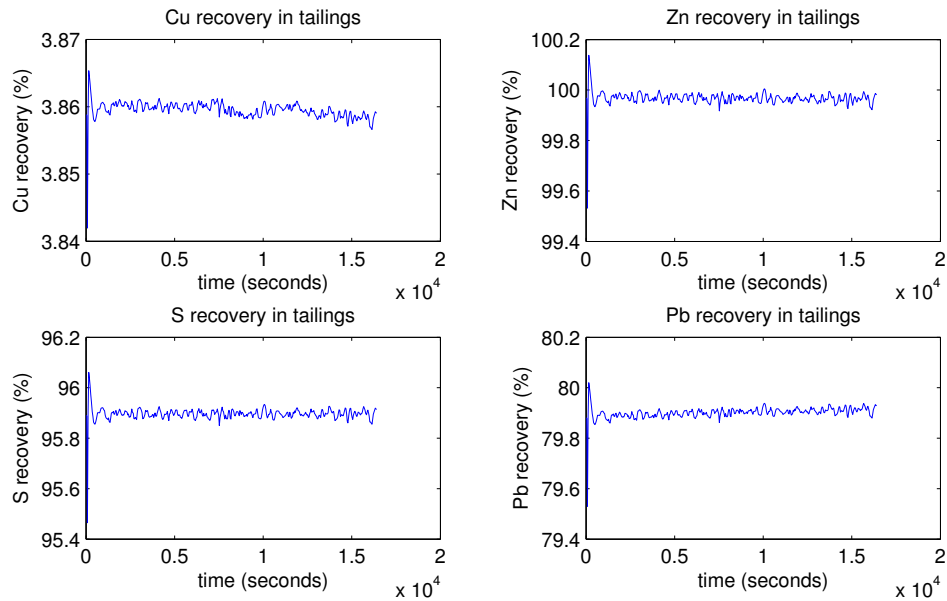
Viitteet

- [1] TEKES, Green Mining -tutkimusohjelman esite. Verkkodokumentti. Saatavissa: <http://www.tekes.fi/ohjelmat-ja-palvelut/ohjelmat-ja-verkostot/green-mining/aineistot/>
- [2] SOREX-tutkimushankkeen kuvaus. Verkkodokumentti. Saatavissa: <http://www.tekes.fi/ohjelmat-ja-palvelut/ohjelmat-ja-verkostot/green-mining/projektit/>
- [3] Robinson, S. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. Chichester, John Wiley & Sons, 2004.
- [4] Trout, O., Loats, H., Mattingly, S. A Water-Immersion Technique for the Study of Mobility of a Pressure-Suited Subject Under Balanced-Gravity Conditions. Verkkodokumentti. NASA Technical Note, Washington D.C., 1966. Saatavissa: <http://crgis.ndc.nasa.gov/crgis/images/0/02/TND-3054.pdf>
- [5] Reinsalo, A. Continuous parameter estimation for online process simulator. Diplomityö, Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, Automaatio- ja systeemitekniikan laitos, Espoo, 2013.
- [6] Johansson, R. *System Modeling & Identification*, 1. painos. New Jersey, Prentice Hall, 1993.
- [7] Nakaya, M., Fukano, G., Onoe, Y., Ohtani, T. On-line Simulator for Plant Operation, *SICE Annual Conference 2005*. Dalian, Kiina, 2005.
- [8] Jaklic, A., Vode, F., Kolenko, T. Online simulation of the slab-reheating process in a pusher-type furnace, *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, s. 1105–1114.
- [9] Kaartinen, J., Pietilä, J., Remes, A., Torttila, S. Using a Virtual Flotation Process to Track a Real Flotation Circuit, *15th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral & Metal Processing*. San Diego, Yhdysvallat, 2013.
- [10] Larminie, J., Dicks, A. *Fuel Cell Systems Explained*, 2. painos. Chichester, John Wiley & Sons, 2000.
- [11] Kawaguchi, K., Onoe, Y., Nakaya, M., Fukano, G., Watanabe, K. An Application of On-Line Tracking Simulator to a PEMFC, *SICE-ICASE International Joint Conference 2006*. Bexco, Korea, 2006.
- [12] Wills, B. A., Napier-Munn, T. J. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*, 7. painos. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2006.

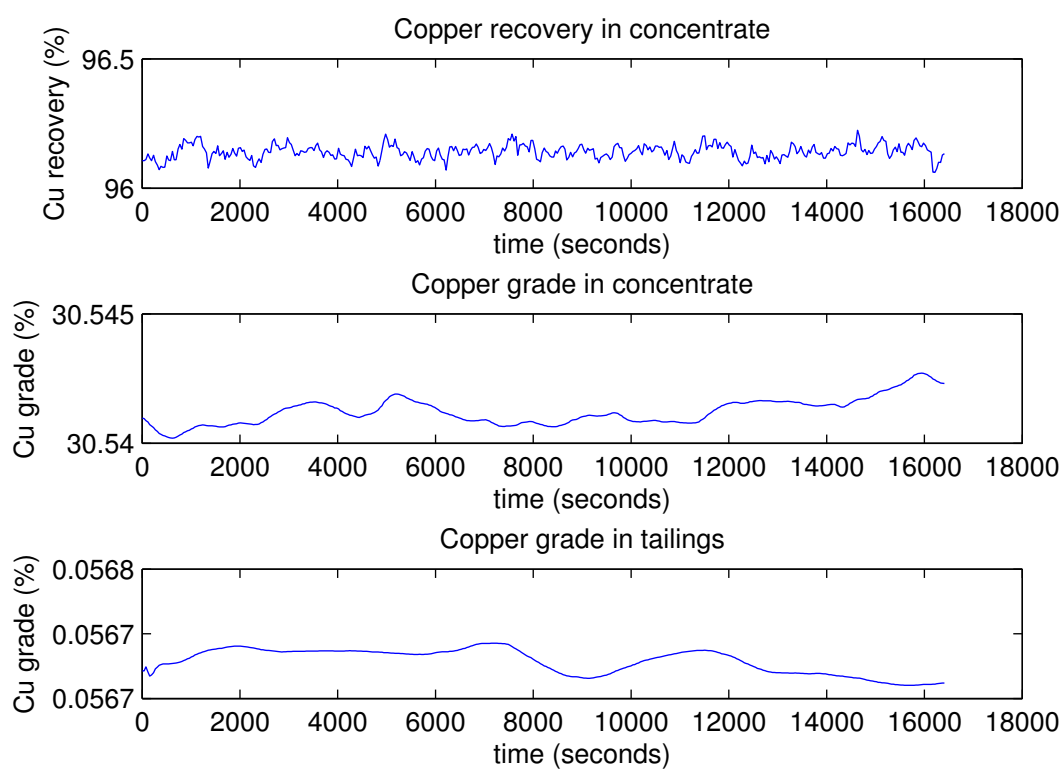
- [13] Greval, I. Mineral Processing Introduction. Verkkodokumentti. Met-Solve Laboratories Inc., Langley, Canada. Viitattu 20.11.2013. Saatavissa: <http://met-sovelabs.com/library/articles/mineral-processing-introduction/>
- [14] Outotec, *HSC Chemistry - Chemical reaction and equilibrium software with thermochemical database and simulation module*, ISBN 978-952-9507-12-2, Pori, Finland.
- [15] Roine, T., Kaartinen, J., Lamberg, P. Training Simulator for Flotation Process Operators, *18th IFAC World Congress*. Milano, Italia, 2011.
- [16] Huuskonen, J., Karjalainen, H., Pekkala, T. *Pyhäsalmi Mine Oy - Rikastusprosessi*, Inmet Mining Corporation ja Pyhäsalmi Mine Oy:n sisäinen dokumentaatio, 2008.
- [17] Huuskonen, J., *Kuparipiirin syötteen raekokojakaumasta*. Sähköpostikeskustelu, 4.3.2013.
- [18] Bailey, D. *Practical SCADA for Industry* Amsterdam; Lontoo, Elsevier, 2003.
- [19] Lamberg, P., Paloranta, S., Aaltonen, A., Myllykangas, H. A property based model of flotation and application in a dynamic simulator for training purposes, *Proceedings of the 48th Annual Conference of Metallurgists of CIM*, Sudbury, Kanada, 2009.
- [20] Dorf, R., Bishop, R. *Modern Control Systems*, 11. painos. New Jersey, Prentice Hall, 2008.
- [21] Fadali, M. S. *Digital Control Engrineering: analysis and design*. Amsterdam; Boston, Elsevier, 2009.
- [22] Sommerville, I. *Software Engineering*, 9. painos. Boston, Pearson, 2011.

A Vaahdotuskerrointen askelvastekokeiden tuloksia

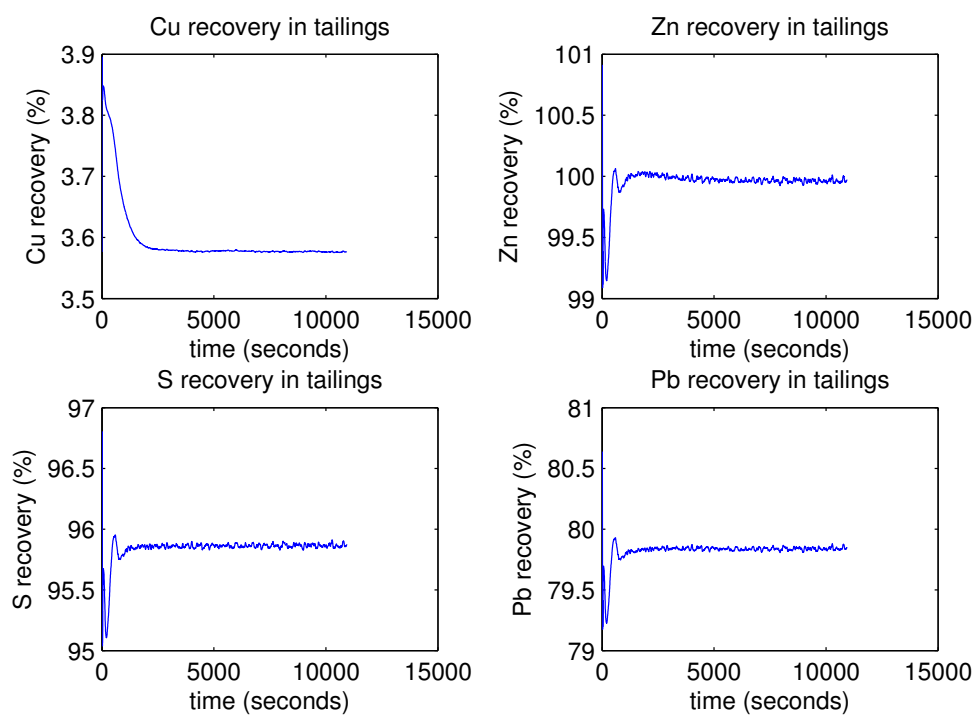
Tässä liitteessä on simulaation viritysparametrien valinnassa käytettyjen askelvastekokeiden tuloksia. Ne ovat kohtuullisen hyvin itsensä selittäviä, mutta mainittakoon, että jokaisesta askelvastekokeesta on kaksi kuvaajaa, joista ensimmäisessä näkyy mineraalien saannit ja toisessa niiden pitoisuudet. kaksi ensimmäistä kuvaajaa ovat vertailukuvaajia, joissa simulaatioon ei ole tehty lainkaan muutoksia, eli pienet muutokset vasteessa ovat kohinaa. Jokaisessa kokeessa yhtä vaahdotuskerrointa on nostettu 20 % lukuunottamatta sivukiven vaahdotuvuuden askelvastekoetta, jossa kerrointa on kasvatettu 100 %.



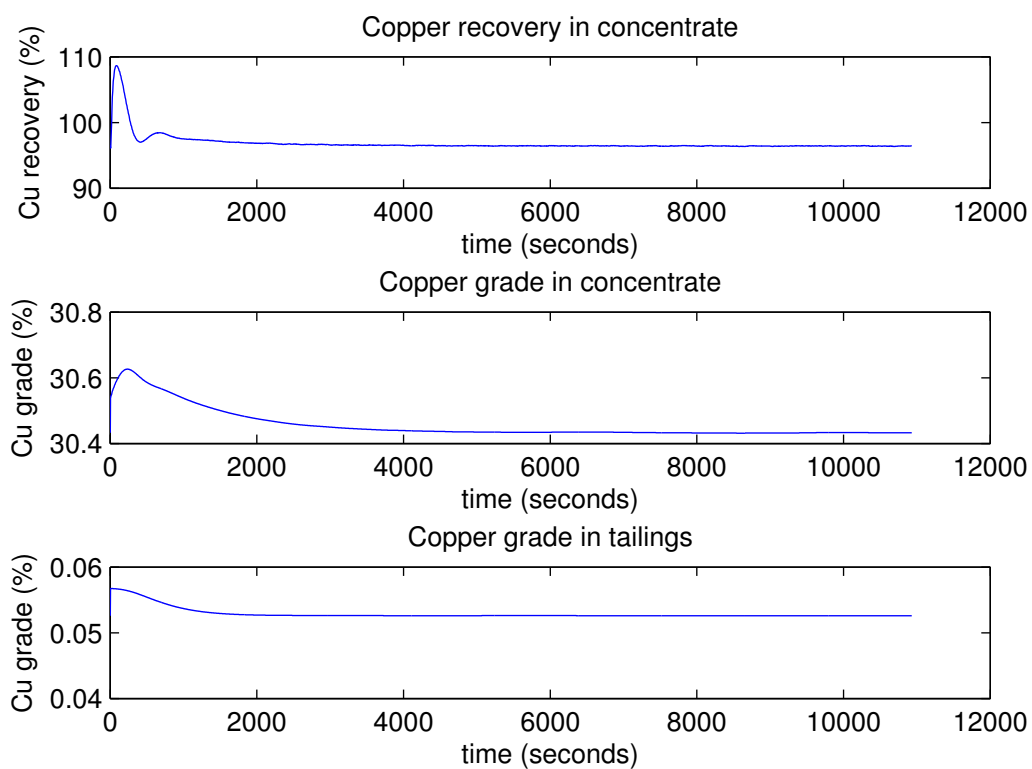
Kuva A1: Vertailutilanne, jossa kaikki kertoimet 1. Kaikkien seurattavien mineraalien saannit jätteesen.



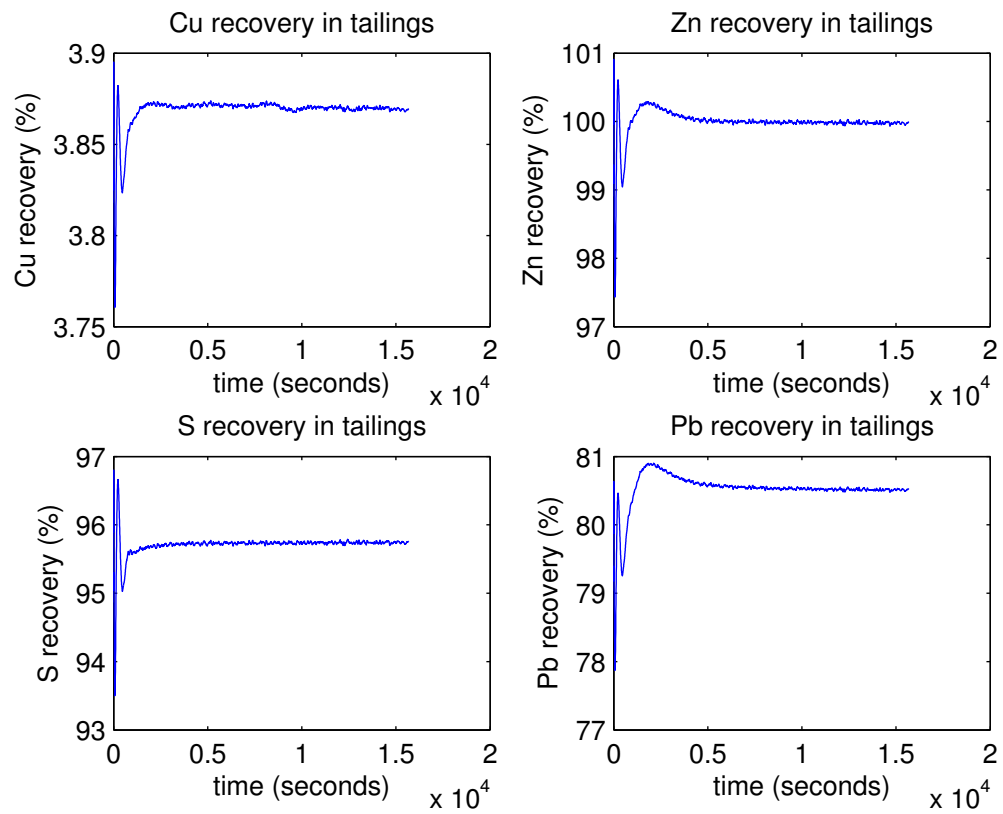
Kuva A2: Vertailutilanne, jossa kaikki kertoimet 1. Kuparin saanti rikasteeseen ja kuparin pitoisuudet jätteessä ja rikasteessa.



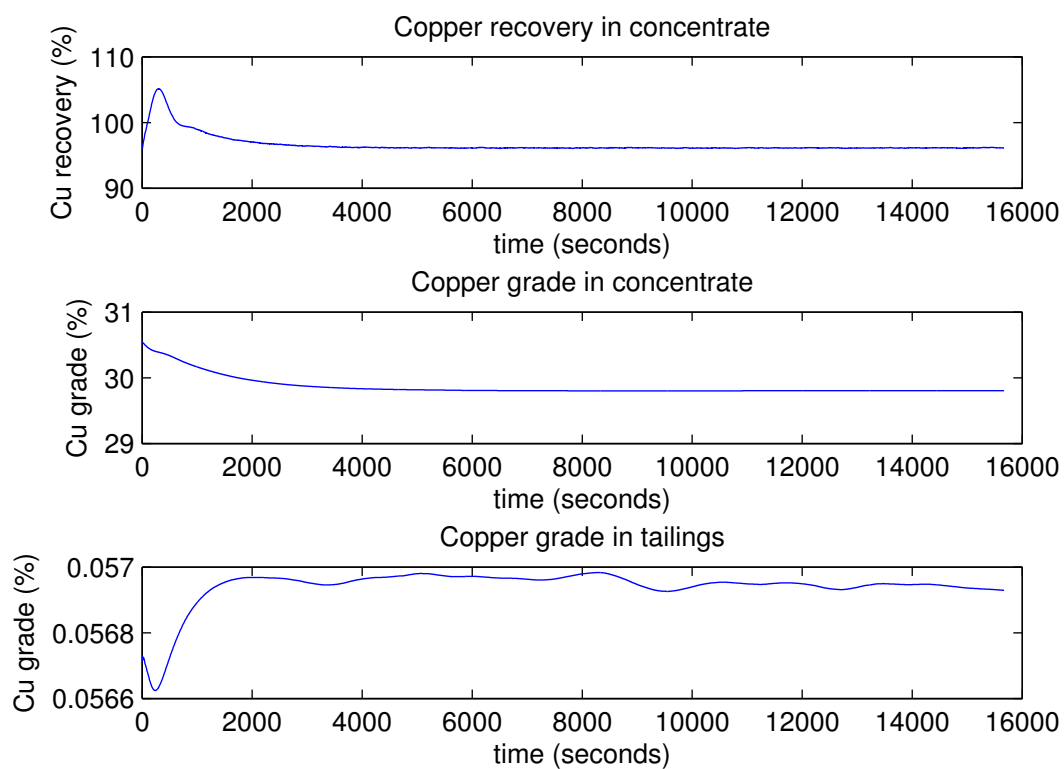
Kuva A3: Kuparikiisun eli kalkopyriitin kertoimen nosto arvosta 1 arvoon 1,2. Mi-neraalien saannit jätteeseen.



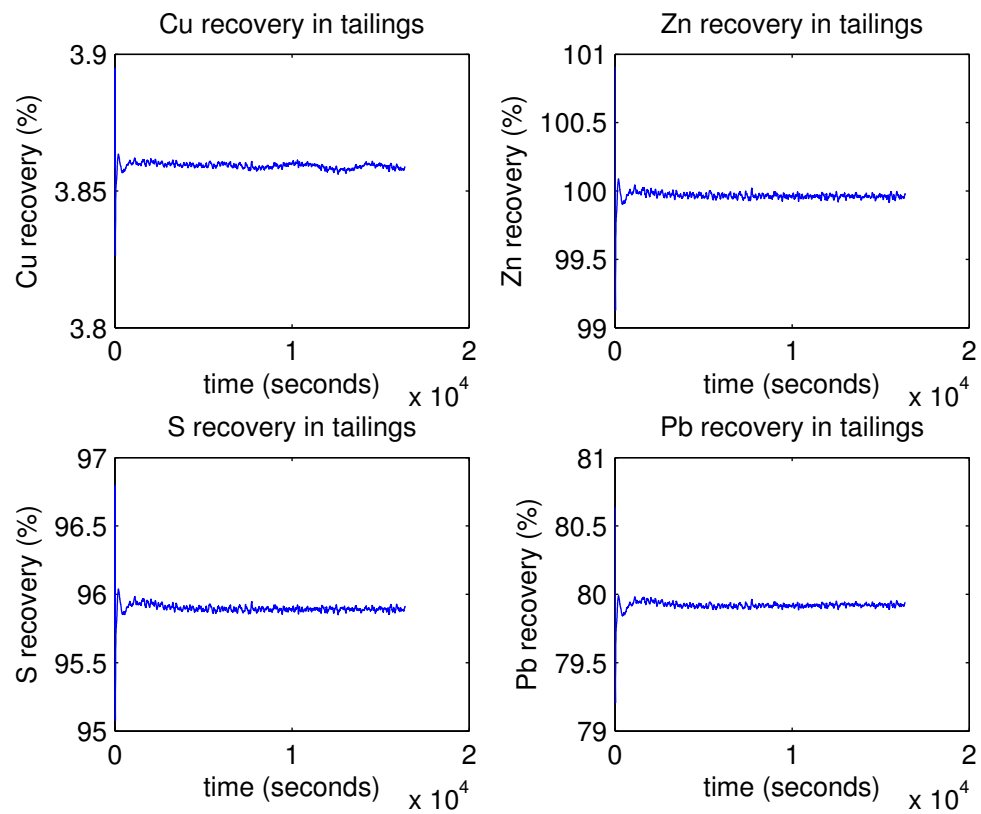
Kuva A4: Kuperikiisun eli kalkopyriitin kertoimen nosto arvosta 1 arvoon 1,2. Kuperin saanti rikasteeseen ja kuparin pitoisuudet jätteessä ja rikasteessa.



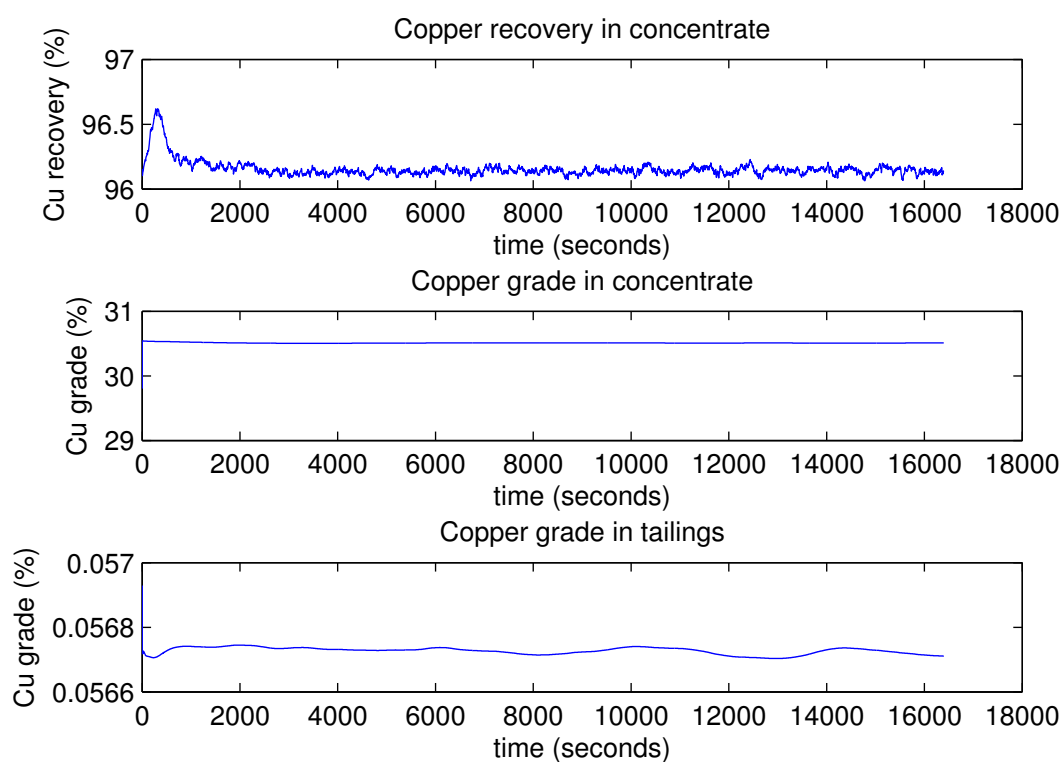
Kuva A5: Rikkikiisun eli pyriitin kertoimen nosto arvosta 1 arvoon 1,2. Mineraalien saannit jätteeseen.



Kuva A6: Rikkikiisun eli pyriitin kertoimen nosto arvosta 1 arvoon 1,2. Kuparin saanti rikasteeseen ja kuparin pitoisuudet jätteessä ja rikasteessa.



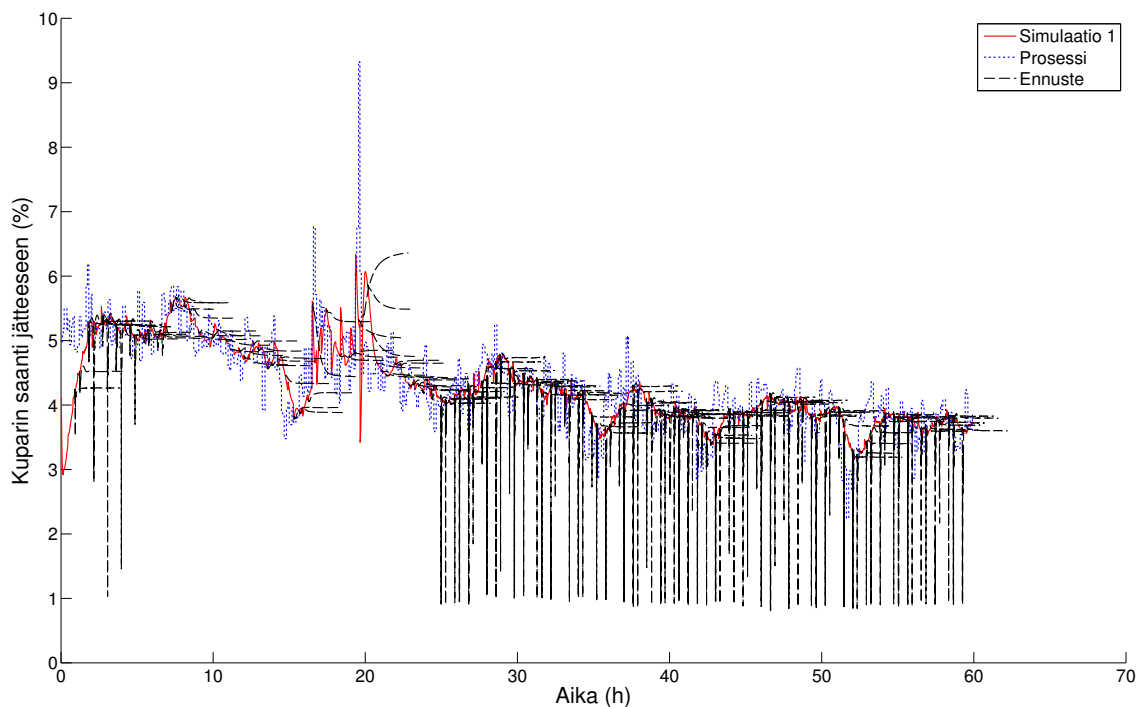
Kuva A7: Sivukiven kertoimen nosto arvosta 1 arvoon 2. Mineraalien saannit jäteteeseen.



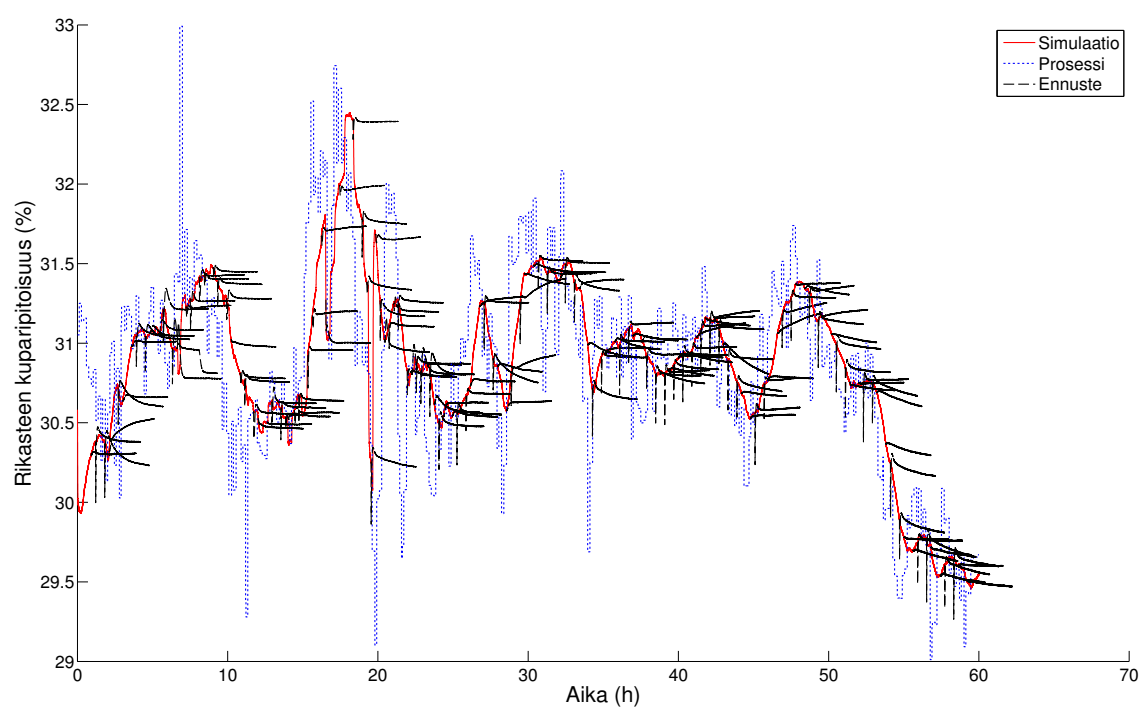
Kuva A8: Sivukiven kertoimen nosto arvosta 1 arvoon 2. Kuparin saanti rikasteeseen ja kuparin pitoisuudet jätteessä ja rikasteessa.

B Häiriölliset ennustekuvaajat

Tulokset osion jatkuvien ennusteiden kuvaajia jouduttiin siistimään luettavuuden parantamiseksi, kuten tekstissäkin mainitaan. Tähän liitteeseen on koottu nämä kuvaajat muokkaamattomina, jotta nähdään, että kyse ei ole tulosten muokkaamisesta, vaan yksinkertaisesti luettavuuden parantamisesta.



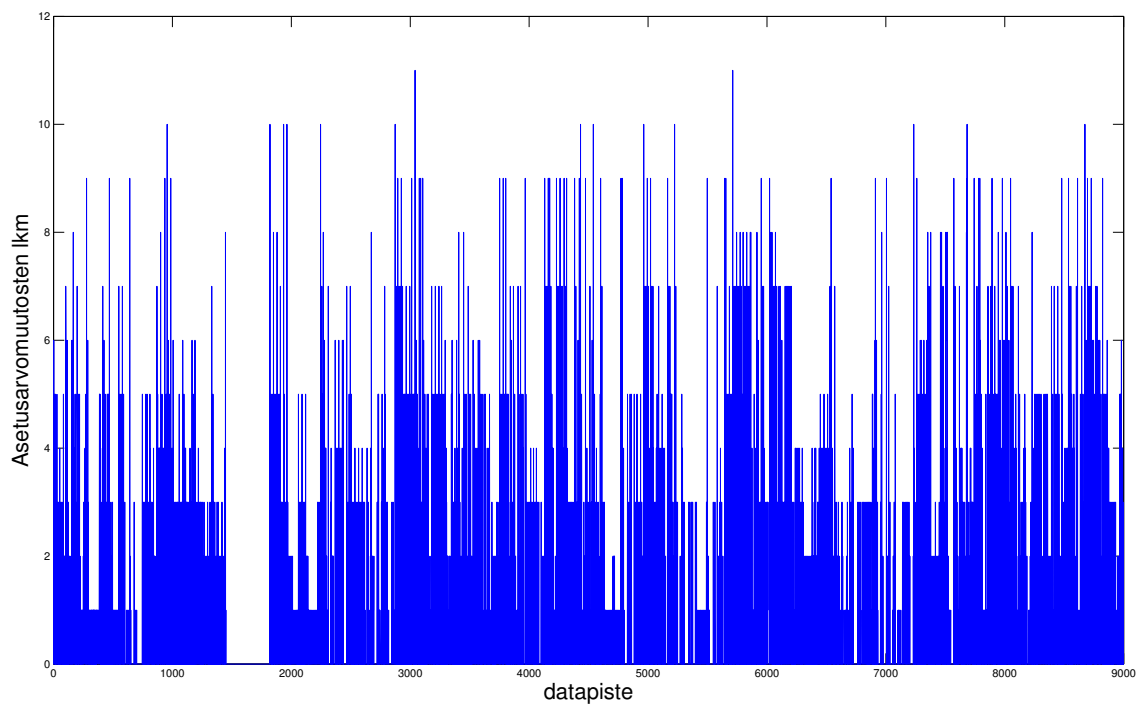
Kuva B1: Kuparin saanti jätteeseen todellisessa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, johon on laskettu myös ennuste saannille. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin laskettu vaste sinisellä katkoviivalla. Lasketut ennusteet näkyvät mustalla katkoviivalla.



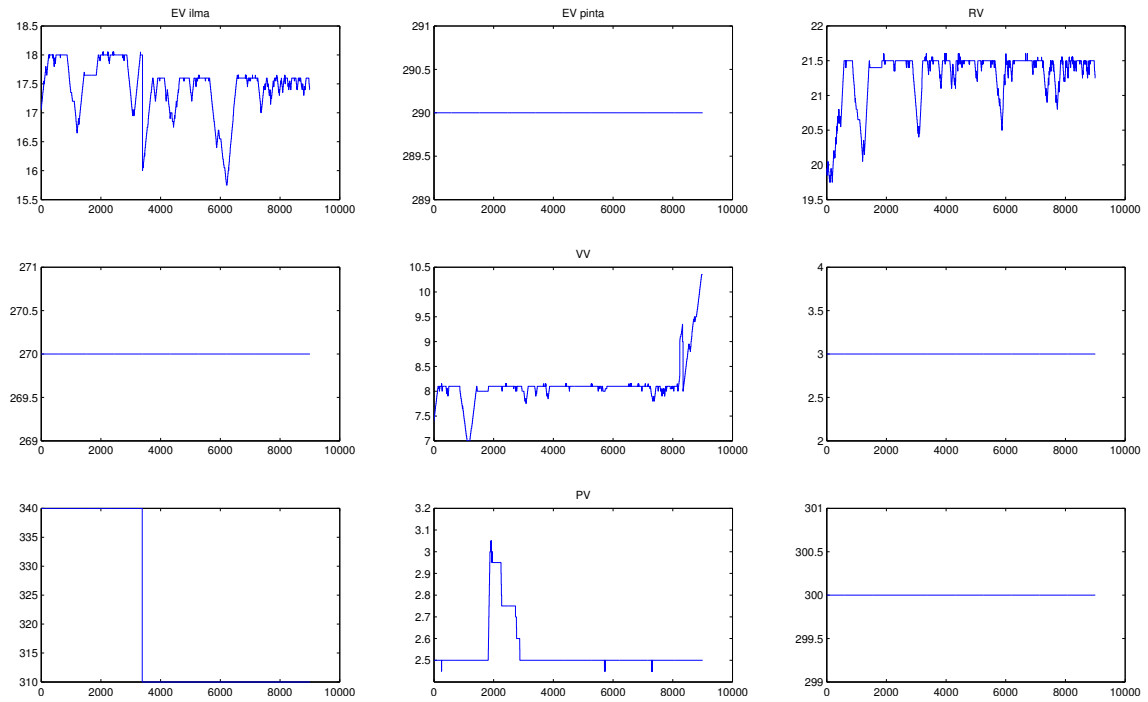
Kuva B2: Kuparirikasteen kuparipitoisuus todellisessa prosessissa sekä adaptoituvassa simulaattorissa, johon on laskettu myös ennuste saannille. Simulaation vaste on piirretty punaisella yhtenäisellä viivalla ja todellisen prosessin laskettu vaste sinisellä katkoviivalla. Lasketut ennusteet näkyvät mustalla katkoviivalla.

C Asetusarvomuutosten analysoinnissa käytetyt kuvaajat

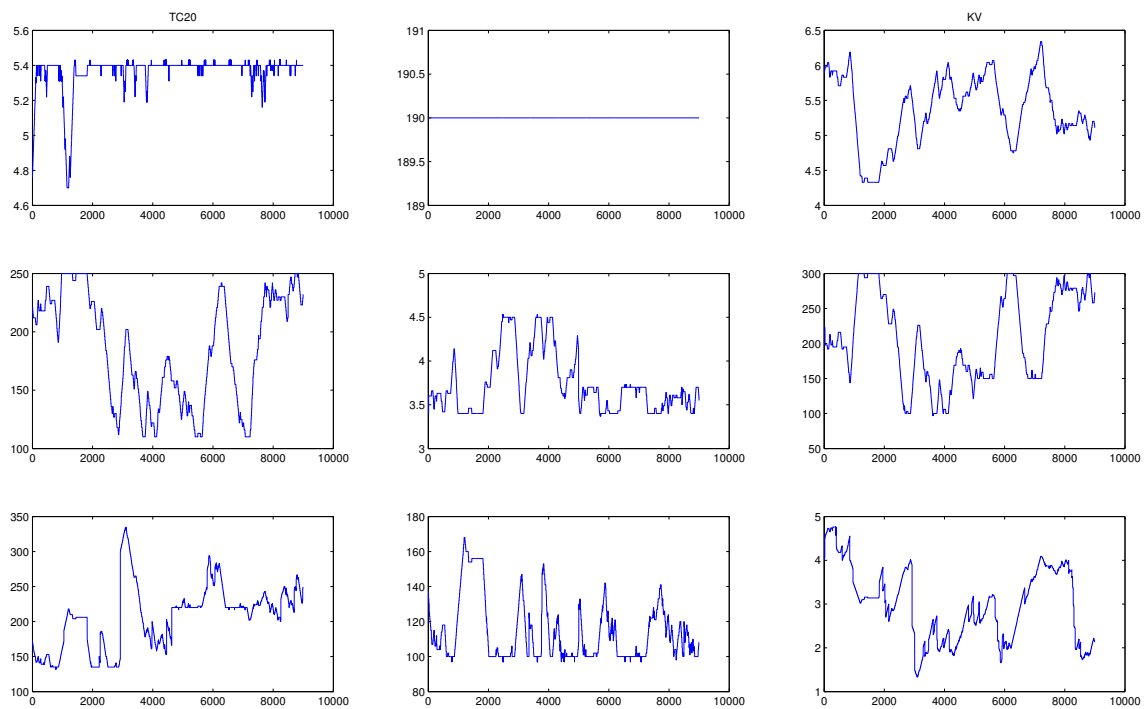
Selvitettäessä asetuarvomuutosten yleisyyttä tehtaalta haettiin kuuden ja puolen vuorokauden ajalta dataa, josta selvitettiin asetuarvomuutosten lukumäärä jokaisessa mittauspisteessä ja lopulta päätettiin piirtää kuvaaja jokaisesta asetusarvosta, jotta saataisiin myös käsitys ohjausten suuruusluokasta.



Kuva C1: Pyhäsalmen rikastamon kuparipiirin tärkeimpien ohjausten asetuarvojen muutosten lukumäärä kuuden ja puolen vuorokauden ajalta. Vaaka-akselilla on datapisteen numero, mutta käytännössä nämä ovat minutteja aikaikkunan alusta laskettuna, sillä järjestelmään tallennetaan arvoja minuutin välein.



Kuva C2: Kugaripiirin tärkeimpien ohjausten asetusarvojen muutokset kuuden ja puolen vuorokauden ajalta (9 ensimmäistä ohjausta).



Kuva C3: Kugaripiirin tärkeimpien ohjausten asetusarvojen muutokset kuuden ja puolen vuorokauden ajalta (lopun 9 ohjausta).